
BACHELORARBEIT

Herr B.Sc.
Jérémie Foulquier

Netzoverschwingungs- kompensation mit Hilfe der Intelligenten Ladesäule

Mittweida, 2012

BACHELORARBEIT

Netz Oberschwingungs- kompensation mit Hilfe der Intelligenten Ladesäule

Autor:

Herr B.Sc Jérémie Foulquier

Studiengang:

Elektrotechnik

Seminargruppe:

ET08wE-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Jan Roloff

Einreichung:

Mittweida, 07.03.2012

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2012

BACHELOR THESIS

Compensation of Harmonics of the Grid by the intelligent charging station

author:

Mr. B.Sc.

Jérémie Foulquier

course of studies:

Electrical Engineering

seminar group:

ET08wE-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

second examiner:

Dipl.-Ing. (FH) Jan Roloff

submission:

Mittweida, 07.03.2012

defence/ evaluation:

Mittweida, 2012

Bibliografische Beschreibung:

Foulquier, Jeremie:

Netzoberschwingungskompensation mit Hilfe der Intelligenten Ladesäule. -

2012. - X, 58, 0 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik,
Bachelorarbeit, 2012

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung der Funktion „Kompensation von Netzoberschwingungen“ mit Hilfe des Wechselrichters der Intelligenten Ladesäule. Das Hauptziel ist die Entwicklung der Oberschwingungserfassung mit der Simulationssoftware Portunus für die spätere Software-Integration in die Intelligente Ladesäule. Der Entwurf einer neuen Regelung wird den Wechselrichter befähigen, die Oberschwingungen der Netzspannung zu kompensieren.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
0 Übersicht.....	1
0.1 <i>Motivation.....</i>	<i>1</i>
0.2 <i>Zielsetzung.....</i>	<i>1</i>
0.3 <i>Kapitelübersicht.....</i>	<i>2</i>
1 Oberschwingungen im Niederspannungsnetz	3
1.1 <i>Entstehung und Auswirkung von Oberschwingungen.....</i>	<i>3</i>
1.2 <i>Oberschwingungsspannung</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Phase der Oberschwingungsspannungen</i>	<i>6</i>
1.4 <i>Oberschwingungsstrom.....</i>	<i>8</i>
2 Prinzip der Oberschwingungskompensation	11
2.1 <i>Spannungsoberschwingungen mit Kompensationsstrom unterdrücken</i>	<i>11</i>
2.2 <i>Auswirkung des Kompensationsstromes in einem Strangnetz.....</i>	<i>13</i>
2.2.1 <i>Unterschiedliche Oberschwingungsfrequenzen.....</i>	<i>13</i>
2.2.2 <i>Unterschiedliche OS-Amplitude, OS-Phase und Netzimpedanz</i>	<i>15</i>
3 Überwachung der Netzfrequenz	19
3.1 <i>Schwankungsbereich der Netzfrequenz</i>	<i>19</i>
3.2 <i>Messverfahren zur Ermittlung der Netzfrequenz im Verteilernetz</i>	<i>21</i>
4 Frequenzanalyse.....	23
4.1 <i>Fourier-Reihen</i>	<i>23</i>
4.2 <i>Diskrete Fourier Transformation (DFT).....</i>	<i>25</i>
4.3 <i>DFT in Portunus</i>	<i>28</i>
4.3.1 <i>Für eine Periode.....</i>	<i>28</i>
4.3.2 <i>Gleitende DFT</i>	<i>29</i>

4.4	<i>Simulationsergebnisse</i>	30
4.4.1	Statische Genauigkeit	30
4.4.1.1	Taktfrequenz des AD-Wandlers	30
4.4.1.2	Simulationsschrittweite, lokale Diskretisierungsfehler.....	30
4.4.1.3	Abweichung der Netzfrequenz	31
4.4.2	Dynamische Genauigkeit	36
4.5	<i>Zusammenfassung zur Auswertung mittels DFT</i>	39
5	Symmetrie des Wechselrichters	41
6	Oberschwingungskompensation mit dem Wechselrichter	45
6.1	<i>Spannungsreglung des Wechselrichters</i>	45
6.1.1	Spannungsreglung ohne Oberschwingung.....	46
6.1.2	Spannungsreglung mit Oberschwingungen.....	47
6.1.2.1	Erste Simulation der OS-Kompensation mit der Spannungsreglung.....	47
6.1.2.2	Kompensationsgrad in Abhängigkeit der P-Regler-Verstärkung.....	48
6.1.2.3	Was bestimmt die Phase des Kompensationsstromes?	50
6.2	<i>Stromreglung des Wechselrichters</i>	51
6.2.1	Reglung des Kompensationsstromes.....	52
6.2.2	Simulation der Oberschwingungskompensation.....	53
7	Ergebnisse und Ausblick	55
7.1	<i>Ergebnisse</i>	55
7.2	<i>Bewertung der Arbeit</i>	56
7.3	<i>Ausblick</i>	56
Literatur		57
Selbstständigkeitserklärung		59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phase der Oberschwingungsspannungen auf den drei Leitern u, v und w	7
Abbildung 2: Grenzwerte für 5. Harmonische nach EN 61000-3-12 [FUBE12]	10
Abbildung 3: Schaltung des Prinzips der Oberschwingungskompensation	11
Abbildung 4: Schaltung des Kompensationsstroms eines Zwei-Strang-Netzes	13
Abbildung 5: Schaltung des Kompensationsstroms eines Zwei-Strang-Netzes	15
Abbildung 6: Kumulierte Häufigkeit der absoluten Schwankungen des Sekundenwerts der Netzfrequenz [NEFEM12].....	20
Abbildung 7: Extremfall von Schwankungen der Netzfrequenz in dem europäischen Netz [ENTSOE12]	20
Abbildung 8: Beispiel DFT: diskretes Eingangssignal und diskreter Einheitszeiger bei $N=16$	27
Abbildung 9: gleitende DFT	29
Abbildung 10: Amplitude und Phase der Fourier-Koeffizienten der Grundschiwingung bei einer Netzfrequenz von 45 Hz	33
Abbildung 11: Amplitude und Phase des Fourier-Koeffizienten der zweiten Oberschwingung bei einer Netzfrequenz von 45 Hz	34
Abbildung 12: DFT ist ein Mittelwert	36
Abbildung 13: Korrekte Abbildung des Ist-Signals nach 20ms, nach einer schnellen Amplitudenänderung	36
Abbildung 14: Wiederherstellung des Signals ($k=0...39$), Amplituden Änderung (240 ms)	37
Abbildung 15: Wiederherstellung des Signals ($k=0...39$), Phasen Änderung (240ms)	37

Abbildung 16: Einfluss einer transienten Überspannung (180V, 2ms) auf das Ergebnis der Amplitude der DFT	37
Abbildung 17: Einfluss einer transienten Überspannung (180V, 2ms) auf die Grundschiwingung ($k=1$)	37
Abbildung 18: Amplituden Änderung der Grundschiwingung erzeugt Oberschiwingung ...	38
Abbildung 19: Schaltung des dreiphasigen Wechselrichters	41
Abbildung 20: Die 8 Standardvektoren [QUANG99]	42
Abbildung 21: Regelkreis des spannungsgeregelten Wechselrichters.....	45
Abbildung 22: Istwerte der Spannungsreglung ohne Oberschiwingung.....	46
Abbildung 23: Ergebnisse der Kompensation / Variation der P-Regler Verstärkung.....	50
Abbildung 24: Regelkreis der Oberschiwingungskompensation	52
Abbildung 25: OS-Kompensation der 3. Harmonischen bei der Ladung der Batterie.....	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normen und Richtlinien der Oberschwingungsspannungen [TÜVS12].....	4
Tabelle 2: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach DIN EN 50160 [HÖGÜ11].....	5
Tabelle 3: Grenzwerte für 95% der 10min-Mittelwerte des Effektivwertes der Oberschwingung [HTWD12].....	5
Tabelle 4: Oberschwingungsspannungen auf den drei Leitern u , v und w im symmetrischen Netz.....	7
Tabelle 5: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach EN 61000-3-2 Klasse A [EMCS11].....	8
Tabelle 6: Minimale Kurzschlussimpedanz nach EN 61000-3-4 [EMCS11]	9
Tabelle 7: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach EN 61000-3-4 Stufe1 [EMCS11]	9
Tabelle 8: Schaltungselement des Prinzips der Oberschwingungskompensation	12
Tabelle 9: Berechnung des Kompensationsstroms.....	12
Tabelle 10: Ergebnis der Simulation des Prinzips der Oberschwingungskompensation ..	12
Tabelle 11: Schaltungselement des Zwei-Strang-Netzes mit verschiedenen Oberschwingungsfrequenzen	13
Tabelle 12: Ergebnis der Simulation der Oberschwingungskompensation eines Zwei-Strang-Netzes	14
Tabelle 13: Schaltungselement des Zwei-Strang-Netzes mit verschiedener Oberschwingung Amplitude, Phase und Netzimpedanz	15
Tabelle 14: Berechnung des Kompensationsstroms.....	16
Tabelle 15: Ergebnis der Simulation der Oberschwingungskompensation eines Zwei-Strang-Netzes	16

Tabelle 16: Abweichung der Netzfrequenz [NEFEM12], [VDN12]	19
Tabelle 17: Zerlegung eines periodischen Signals in eine Fourier-Reihe	23
Tabelle 18: Hintransformation der Fourier-Reihenentwicklung	24
Tabelle 19: Verschiebung des Frequenzspektrums.....	24
Tabelle 20: Hintransformation der diskreten Fourier Transformation	26
Tabelle 21: Zerlegung des komplexen Koeffizienten der DFT	28
Tabelle 22: Amplitude und Phase Notation	28
Tabelle 23: Berechnung des Korrekturwinkels der DFT	28
Tabelle 24: Einfluss der Taktfrequenz, der Simulationsschrittweite und des lokalen Diskretisierungsfehlers auf die Genauigkeit der DFT	31
Tabelle 25: Amplituden Spektrum der DFT-Berechnungsschritte bei einer Abweichung der Netzfrequenz Δf	32
Tabelle 26: DFT-Auswertung der Oberschwingungsamplitude bei Netzfrequenzabweichung.....	34
Tabelle 27: Messung von Oberschwingungen, die nur durch die Abweichung von der Netzfrequenz berechnet werden	34
Tabelle 28: Messung von einer präsenten Oberschwingung bei einer Abweichung der Netzfrequenz	35
Tabelle 29: Auflösung der Analyse-Frequenz der DFT in Abhängigkeit der Taktfrequenz	35
Tabelle 30: Standard Vektoren und Ausgangsspannungen der Transistorpaare	43
Tabelle 31: Regler-Ausgangswerte der Stromreglung, $U_{zk} = 800V$	47
Tabelle 32: OS-Kompensation mit der Spannungsreglung.....	48
Tabelle 33: Regler Ausgangswerte der Stromreglung, $U_{zk} = 1800V$	48
Tabelle 34: Verbesserung der Spannungsreglung mittel $100\mu s$ Mittelwert	49
Tabelle 35: Simulationsparameter / Variation der P-Regler Verstärkung.....	49

Tabelle 36: Messwerte Netzspannung / Variation der P-Regler Verstärkung.....	49
Tabelle 37: Simulationsparameter / Variation der Netzimpedanz.....	50
Tabelle 38: Messwerte Netzspannung / Variation der Netzimpedanz	50
Tabelle 39: Messwerte Netzstrom / Variation der Netzimpedanz.....	51
Tabelle 40: Simulationsparameter / Stromreglung	53

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnungsgrundsätze

Grundsätzlich gelten für die vorliegende Arbeit folgende Konventionen, die anhand der virtuellen Größe x erläutert werden:

x	-	skalare Größe im Zeitbereich
\underline{x}	-	Zeiger im Zeitbereich
X	-	Effektivwert
\hat{x}	-	Amplitude

Wichtige Indizes

1	-	Grundschwingung (Mitsystem)
2, 3, ...	-	Harmonische oder Samplenummer
d,q	-	rotorflussfeste Koordinatensystem
ist	-	Istwert
k	-	Ordnung einer Harmonischen
N	-	Netz
n	-	Samplenummer
nenn	-	Nenngrößen
soll	-	Sollwert
u, v, w	-	Phasen u, v, w
α, β	-	ständerfeste Koordinatensystem

Zeiten, Frequenzen und allgemeine Symbole

f	-	Frequenz
f_s	-	Taktfrequenz
f_D	-	DFT-Analyse-Frequenz

f_N	-	Netzfrequenz
K_i	-	Verstärkung eines Integralglieds
K_p	-	Verstärkung eines Proportionalglieds
T	-	Periode
N	-	Anzahl der Sample in einer Periode T
n	-	Samplenummer
φ	-	Phase bzw. Winkel
ω	-	Kreisfrequenz
θ_u	-	Lagewinkel des Spannungszeigers

Elektrische Größen

P_{lt}	-	Langzeitflickerstärke
R_d, L_d	-	Wirk- und Blindanteil der Glättungsdrosseln
R_{sce}	-	Kurzschlussverhältnis
S_k''	-	Kurzschlussleistung des Netzes
S_{rG}	-	Bemessungsleistung
u_A	-	Spannung am Netzanschlusspunkt der Ladesäule
u_{TR}	-	Ausgangsspannung eines Transistorpaares
U_{zk}	-	Zwischenkreisspannung
Z	-	Netzimpedanz

Abkürzungen

DFT	-	Diskrete Fourier Transformation
DIN-EN	-	Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm
DSP	-	Digitaler Signalprozessor
EVU	-	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
FFT	-	Fast Fourier Transform
H _{MIN} , H _{MAX}	-	Simulationsschrittweite
IEC	-	International Electrotechnical Commission
IGBT	-	Insulated Gate Bipolar Transistor
LDE	-	Lokal Diskretisierungs Fehler
NS	-	Niederspannung
OS	-	Oberschwingung
THD	-	Total Harmonic Distortion
TR	-	Transistor
VDE	-	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

0 Übersicht

0.1 Motivation

Die Energiewende Deutschlands fordert die dezentrale Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien. Die Übertragung und Verteilung dieser elektrischen Energien ist für das elektrische Netz eine neue Herausforderung. Diese neuen Erzeuger speisen umweltfreundliche Energie ein, die aber gleichzeitig die Qualität und Sicherheit des Netzes beeinträchtigen. Eine dezentrale Regulierung der Spannung und des Energieflusses ist einer der Schlüsselpunkte in der Modernisierung des öffentlichen Energieversorgungsnetzes.

Parallel zur Energiewende hat die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2020 1 Million Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bringen. Durch die Kombination von E-Fahrzeugen und erneuerbaren Energien sollen die CO₂-Emissionen reduziert werden. Die zukünftige E-Fahrzeugflotte stellt mit einer Speicherkapazität von mehreren Gigawattstunden für das elektrische Netz eine interessante Möglichkeit der Pufferung von Energieschwankungen dar [NPE12]. Intelligente Ladesäulen werden die E-Fahrzeuge mit dem Energienetz verbinden. Durch bidirektionales Laden wird eine positive wie negative Reserveleistung zur Verfügung gestellt. Die Regulierung der Netzspannung durch Wirk- und Blindleistungseinspeisung sowie Oberschwingungskompensation sind die technischen Herausforderungen einer Intelligenten Ladesäule. Durch den Beitrag der Intelligenten Ladesäule zur Verbesserung der Netzqualität und Netzsicherheit entsteht neben der Reduktion von CO₂-Emissionen ein weiterer Vorteil, der der E-Mobilität zum Durchbruch verhelfen kann.

0.2 Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben mit dem übergeordneten Thema Elektromobilität der Professur Antriebs- und Regelungstechnik, befasst sich mit der Entwicklung und Realisierung einer Intelligenten Ladesäule. In einer vorherigen Untersuchung wurden die Fähigkeiten des Wechselrichters im Bereich des bidirektionalen Energieflusses und der Blindleistungseinspeisung simuliert und deren Wirksamkeit nachgewiesen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung der Funktion „Kompensation der Netzsüberschwingungen“ mit Hilfe des Wechselrichters der Intelligenten Ladesäule. Das Hauptziel ist die Entwicklung der Oberschwingungserfassung mit der Simulationssoftware Portunus für die spätere Software-Integration in die Intelligente Ladesäule. Der Entwurf einer neuen Regelung soll den Wechselrichter befähigen, die Oberschwingungen der Netzspannung zu kompensieren.

0.3 Kapitelübersicht

Diese Bachelorarbeit enthält sieben Kapitel.

Kapitel 1 führt in die Problematik der Oberschwingungen im Niederspannungsnetz ein und gibt einen Überblick zu Normen und erläutert sie.

Das zentrale Thema der Oberschwingungskompensation wird aus der theoretischen Sichtweise in Kapitel 2 behandelt. Die Berechnung des Kompensationsstroms wird mit einfachen Ersatzschaltbildern beschrieben und geprüft.

Ein Einblick in die Schwankungen der Netzfrequenz und Verfahren zur Netzfrequenzmessung werden in Kapitel 3 erklärt.

In Kapitel 4 wird die Frequenzanalyse der Netzspannung ausführlich behandelt. Mit der Diskret Fourier Transformation (DFT) wird die Amplitude und Phase jeder Netzbereichung ermittelt. Nach einer theoretischen Betrachtung der Fourier-Transformation wird auch die rechenzeitoptimale DFT-Modulbeschreibung durchgeführt und anschließend in verschiedenen Simulationsszenarios weiter untersucht.

Die Fähigkeit des Wechselrichters, unsymmetrisch verteilte Oberschwingungen zu reduzieren, wird im Kapitel 5 beschrieben.

Aufbauend auf die vorangegangenen Kapitel werden in Kapitel 6 zwei Regelungen für den Wechselrichter vorgestellt. Die Spannungsregelung zeigt begrenzte Wirkung bei der Oberschwingungskompensation, deswegen fokussiert diese Arbeit auf die Stromregelung.

Abschließend werden in Kapitel 7 Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick gegeben.

1 Oberschwingungen im Niederspannungsnetz

1.1 Entstehung und Auswirkung von Oberschwingungen

Oberschwingungen (OS) sind periodische Verzerrungen der sinusförmigen Netzspannungen und Netzströme. Sie entstehen durch nichtlineare Lasten und leistungselektronische Betriebsmittel mit nichtlinearer Kennlinie. Gleichrichter, Schaltnetzteile, elektronische Vorschaltgeräte, Frequenzumrichter für Motorantriebe, sowie Photovoltaik-Anlagen und Windkraftanlagen enthalten nichtlineare Bauteile wie Thyristoren, Varistoren, Dioden und IGBTs. Die ständig wachsende Anzahl dieser nichtlinearen Geräte macht die Problematik der Netzoerschwingungen zu einem aktuellen Thema.

Die Oberschwingungen haben eine negative Auswirkung. Sie erhöhen den Gesamtstrom und beanspruchen das Netz, ohne eine effektiv am Verbraucher wirksame Leistung zu bewirken. Sie führen zu höherer Strombelastung des Nullleiters gegenüber den Außenleitern und die Eisenverluste in Transformatoren und Motoren nehmen zu. Die Folgen sind ein schlechter Wirkungsgrad, eine Überhitzung der Komponenten sowie eine erhöhte Brandgefahr. Oberschwingungen verursachen Pendelmomente in Motoren und Überspannung, sie beeinflussen die Abschaltcharakteristik von Schutzschaltern und führen zu Fehlauslösungen.

Als erste Klassifikation werden OS in zwei Gruppen eingeteilt. Zum einen gibt es Harmonische, die ganzzahlige Vielfache der 50Hz-Netzfrequenz sind und folgende Frequenzen besitzen: 2. Ordnung (100 Hz), 3. Ordnung (150 Hz), 4. Ordnung (200 Hz), 5. Ordnung (250 Hz), 6. Ordnung (300 Hz), usw. Andererseits gibt es Zwischenharmonische Frequenzen, die nichtganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind. [ELCO12]

Unter dem Begriff Oberschwingungen sind am häufigsten Harmonische gemeint und werden in dieser Arbeit ausschließlich behandelt.

1.2 Oberschwingungsspannung

Oberschwingungsspannungen sind auf dem ganzen Netz verteilt. In den Normen und Richtlinien für das Niederspannungsnetz sind Grenzwerte für jede einzelne Harmonische sowie für den Gesamtoberschwingungsgehalt gegeben.

Verträglichkeitspegel für Oberschwingungsspannungen	
IEC 61000-2-4 VDE 0839-2-4	in Industrienetzen
IEC 61000-2-2 VDE 0839-2-2 EN 50160 VDEW-Richtlinie	im öffentlichen NS-Netz

Tabelle 1: Normen und Richtlinien der Oberschwingungsspannungen [TÜVS12]

Die einzelnen Merkmale der Spannung in öffentlichen Energieversorgungsnetzen sind in der Norm DIN-EN 50160 angegeben.

Merkmal	Anforderungen	Messintervall	Betrach- tungs- zeitraum
Netzfrequenz	Verbundnetz: 50 Hz +4%/-6% dauernd 50 Hz $\pm 1\%$ während $\geq 99,5\%$ eines Jahres	10-sec- Mittelwert	1 Jahr
Langsame Spannungs- änderungen	$U_{\text{nenn}} +10\% / -15\%$ dauernd $U_{\text{nenn}} \pm 10\%$ während $\geq 95\%$ einer Woche	10-min- Mittelwert	1 Woche
Flicker / Schnelle Spannungs- änderungen	Langzeitflickerstärke $P_{\text{lt}} < 1$ während $\geq 95\%$ einer Woche und $\Delta U_{10\text{ms}} < 2\% U_{\text{nenn}}$	2 h (Flickermeter gemäß EN 61000-4-15)	1 Woche
Spannungs- unsymmetrie	$U_{\text{Gegensystem}} / U_{\text{Mitsystem}} < 2\%$ während $\geq 95\%$ einer Woche	10-min- Mittelwert	1 Woche
Oberschwingungen	$< \text{Grenzwert lt. Tabelle 3}$ und THD $< 8\%$ während $> 95\%$ einer Woche	10-min- Mittelwert jeder Harmonischen	1 Woche
Zwischen- harmonische	In Beratung		1 Woche

Signalspannungen	Signalspannungen < Normkennlinie während 99 % eines Tages	3-sec-Mittelwert	1 Tag
Spannungseinbrüche	Anzahl < 10 ... 1000 / Jahr; davon > 50% mit Dauer < 1s und $\Delta U_{10ms} < 60\% U_{nenn}$	10-ms-Effektivwert $U_{10ms} = 1...90\% U_{nenn}$	1 Jahr
Kurze Spannungsunterbrechungen	Anzahl < 10 ... 1000 / Jahr; davon > 70 % mit Dauer < 1s	10-ms-Effektivwert $U_{10ms} \leq 1\% U_{nenn}$	1 Jahr
Lange Spannungsunterbrechungen	Anzahl < 10 ... 50 / Jahr mit Dauer > 3 min		1 Jahr
Zeitweilige Überspannung (L-N)	Anzahl < 10 ... 1000 / Jahr; davon > 70 % mit Dauer < 1s	10-ms-Effektivwert $U_{10ms} > 110\% U_{nenn}$	1 Jahr
Transiente Überspannung	< 6 kV; μs ... ms		k. A.

Tabelle 2: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach DIN EN 50160 [HÖGÜ11]

Oberschwingungsspannung: 95% der 10min-Mittelwerte des Effektivwertes der Oberschwingung dürfen den in Tabelle 3 genannten Wert in einem beliebigen Wochenintervall nicht überschreiten.

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nichtvielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung k	U _k / U ₁ in %	Ordnung k	U _k / U ₁ in %	Ordnung k	U _k / U ₁ in %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 bis 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tabelle 3: Grenzwerte für 95% der 10min-Mittelwerte des Effektivwertes der Oberschwingung [HTWD12]

Der Gesamtoberschwingungsgehalt (Total Harmonic Distortion THD) darf einen Wert von 8% nicht überschreiten. Für die THD-Berechnung müssen die zu messenden Oberschwingungsspannungen bis zur 40. Ordnung betrachtet werden.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} (U_k)^2}}{U_1}$$

Die Oberschwingungen mit dem größten Grenzwert innerhalb der Norm werden von Gleichrichterschaltungen erzeugt,

$$k = g \cdot p \pm 1$$

p: Pulszahl des Gleichrichters

g = 1,2,3,4, ... ∞

so verursacht die B6-Gleichrichtung die 5. 7. 11. 13. ... OS.

Zwischenharmonische Spannung: Da keine gesicherten Erfahrungswerte vorhanden sind, erfolgt zurzeit keine Festlegung.

1.3 Phase der Oberschwingungsspannungen

Oberschwingung mit positiver Sequenz ([1.], 4., 7., 10., ...) - auch Mitsystem - rechtsdrehendes Drehfeld sind „normale“ Komponenten, die in jedem symmetrischen Drehstromsystem vorhanden sind. Sie verursachen in Motoren ein schneller umlaufendes Drehfeld als die Grundschwingung, dem der Rotor aber nicht folgen kann und so verringert sich das nutzbare Drehmoment.

OS mit negativer Sequenz (2., 5., 8., 11., ...) - auch Gegensystem - linksdrehendes Drehfeld verursachen in Motoren ein entgegengesetzt umlaufendes Drehfeld bezogen auf die Grundschwingung und verringern damit das Drehmoment (Bremsseffekt) und Hitzeentwicklung.

OS mit Null-Sequenz (3., 6., 9., 12., ...) - auch Nullsystem - kein Drehfeld können bei asymmetrischer Last in einem 4-Leiter-System auftreten. Die Ströme addieren sich im Neutralleiter und stellen somit eine Überhitzungsgefahr dar. [ELCO12]

Voraussetzung für die zuvor genannte Einteilung der Harmonischen sind symmetrische Netzverhältnisse und eine symmetrische Aufteilung der Oberschwingungserzeuger auf drei Phasen. Jede Harmonische kann mit den Gleichungen in Tabelle 4 beschrieben werden.

OS-spannung Leiter u	$u_{uk}(t) = \hat{u}_k \cdot \sin(k\omega t)$
OS-spannung Leiter v	$u_{vk}(t) = \hat{u}_k \cdot \sin(k(\omega t - 120^\circ))$
OS-spannung Leiter w	$u_{wk}(t) = \hat{u}_k \cdot \sin(k(\omega t + 120^\circ))$

Tabelle 4: Oberschwingungsspannungen auf den drei Leitern **u, **v** und **w** im symmetrischen Netz**

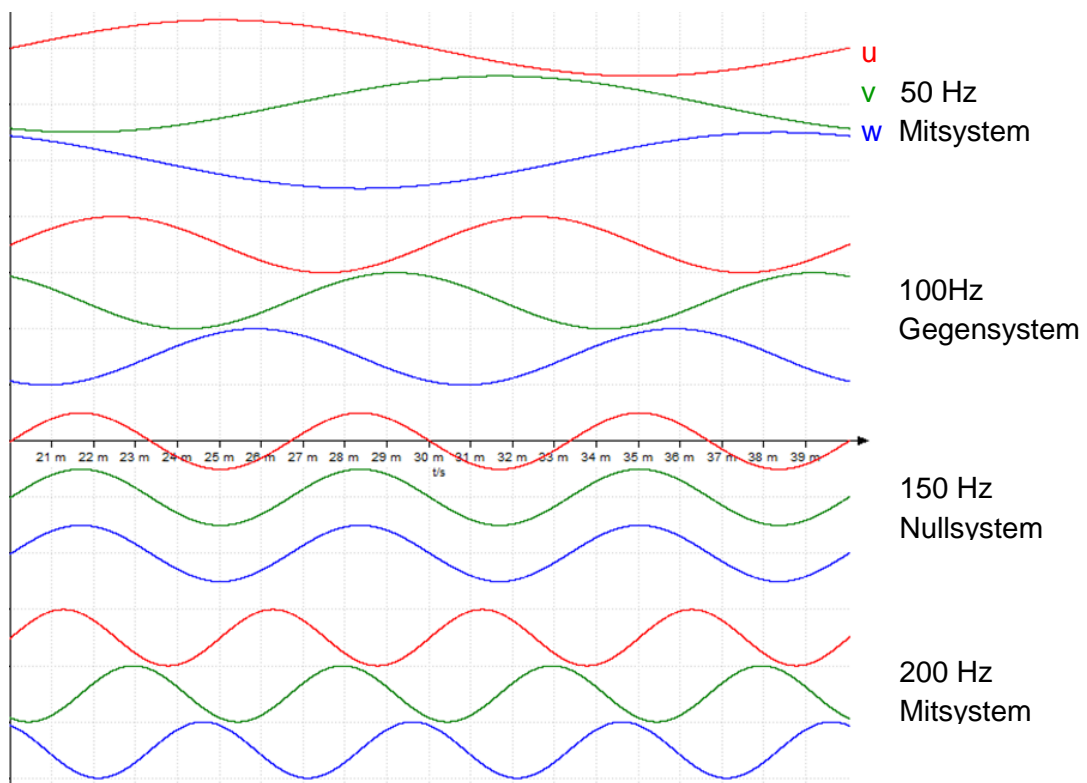


Abbildung 1: Phase der Oberschwingungsspannungen auf den drei Leitern **u, **v** und **w****

1.4 Oberschwingungsstrom

Die Grenzwerte der Oberschwingungsströme werden je nach Gerät in drei Kategorien unterschieden. Die Kategorien werden anhand des Eingangsstromes des Gerätes festgelegt.

Kategorie 1: EN 61000-3-2: bei Geräte-Eingangsströmen bis 16 A

Diese Kategorie ist zusätzlich in vier Klassen unterteilt:

Klasse A symmetrische dreiphasige Geräte und alle Geräte ausgenommen Geräte der Klasse B,C,D

Klasse B tragbare Elektrowerkzeuge (1,5-fache Grenzwerte der Klasse A)

Klasse C Beleuchtungseinrichtungen

Klasse D Für Geräte mit Gleichrichtern und kapazitiver Glättung (Computer, TV-Geräte etc.) 75 W - 600 W

Klasse A	Gerade Harmonische				Ungerade Harmonische						
Ordnung k	2	4	6	8 - 40	3	5	7	9	11	13	15-39
Ik in A	1,08	0,43	0,3	1,84/k	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	2,25/k

Tabelle 5: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach EN 61000-3-2 Klasse A [EMCS11]

Die Grenzwerte in Tabelle 5 sind absolute Oberschwingungsgrenzwerte in Ampere für jede einzelne Harmonische bis zur 40. Ordnung. Sie gelten für Geräte der Klasse A.

Kategorie 2: EN 61000-3-4: bei Geräte-Eingangsströmen über 16 A

und

Kategorie 3: EN 61000-3-12: bei Geräte-Eingangsströmen von 16 A bis 75 A

Die Grenzwerte sind in Abhängigkeit von der Kurzschlussleistung des Versorgungsnetzes am Verknüpfungspunkt des Gerätes definiert. Ein Kurzschlussverhältnis von mindestens 33 ist erforderlich (Tabelle 6).

Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt (Z: Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt)	$S_k'' = \frac{U_N^2}{Z}$
Bemessungsleistung des Gerätes (für dreiphasige symmetrische Geräte)	$S_{rG} = 3 \cdot U_{nenn} \cdot I_{nenn}$
Kurzschlussverhältnis (für dreiphasige Geräte)	$R_{sce} = \frac{S_k''}{S_{rG}} \geq 33$

Tabelle 6: Minimale Kurzschlussimpedanz nach EN 61000-3-4 [EMCS11]

Die Begrenzung der Oberschwingungsströme ist in drei Stufen einzuordnen:

- Stufe 1: Allgemeine Erlaubnis mit relativem Oberschwingungsgrenzwert in % von I₁ (Tabelle 7)
- Stufe 2: Erlaubnis für höhere Grenzwerte müssen vom EVU bestätigt werden (Abbildung 2)
- Stufe 3: Grenzwerte können nicht eingehalten werden und erfordern eine Vereinbarung mit EVU

Ordnung k	I _k / I ₁ in %	Ordnung k	I _k / I ₁ in %
3	21,6	21	0,6
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	0,6
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	≥ 33	≤ 0,6
17	1,2		
19	1,1	Gerade	≤ 8/k oder ≤ 0,6

Tabelle 7: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach EN 61000-3-4 Stufe1 [EMCS11]

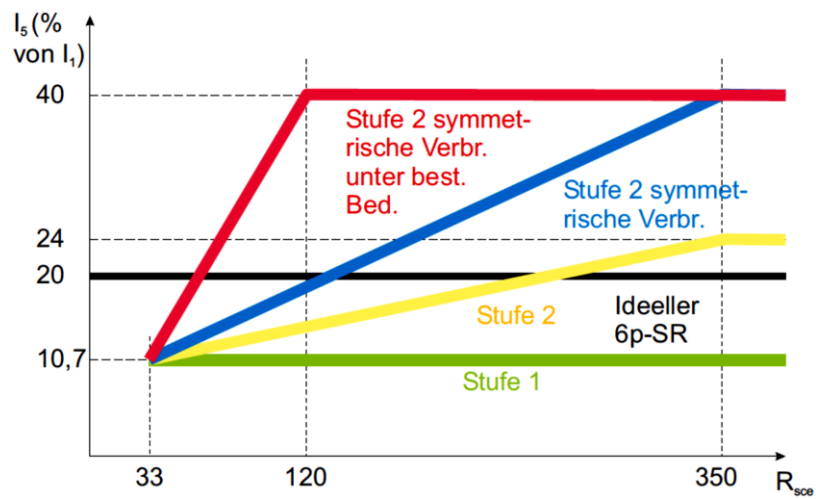


Abbildung 2: Grenzwerte für 5. Harmonische nach EN 61000-3-12 [FUBE12]

2 Prinzip der Oberschwingungskompensation

Ziel dieses Kapitels ist die Reduzierung bzw. Eliminierung der Oberschwingungsspannungen an einem Netzanschlusspunkt. Nur die Grundfrequenz 50Hz soll noch am Netzanschlusspunkt präsent sein. Die Netzimpedanz an diesem Netzanschlusspunkt ist bekannt. Die Ladesäule arbeitet als Stromquelle und speist den phasennegierten Kompensationsstrom ins Netz ein. Dieser Strom verursacht einen Spannungsabfall über der Netzimpedanz, um so mit entgegengesetzter Phasenlage die Oberschwingungen der Netzspannung zu kompensieren.

Das symmetrische dreiphasige Netz wird im folgenden Kapitel einphasig dargestellt.

Die Netzwerke wurden mit der Simulationssoftware Portunus untersucht.

Die Simulationssoftware Portunus bietet eine FFT-Modul im Postprozessor zur Auswertung der simulierten Ströme und Spannungen. Der Simulationsparameter LDE (Lokaler Diskretisierungsfehler) hat einen starken Einfluss auf die Genauigkeit des FFT-Moduls. Für eine hohe Genauigkeit der FFT-Auswertung muss ein kleiner LDE = 0,01% eingestellt werden. Die damit erreichbaren Simulationsergebnisse entsprechen der Realität.

2.1 Spannungsoberschwingungen mit Kompensationsstrom unterdrücken

Das Spektrum der Netzoerschwingungen wurde für das folgende Beispiel auf die dritte Oberschwingung reduziert.

Die Netzspannung enthält die Grundfrequenz 50Hz und die dritte Oberschwingung mit einer Frequenz von 150Hz und einer Amplitude von 10V. Am Netzanschlusspunkt A soll die Ladesäule diese dritte Oberschwingung kompensieren.

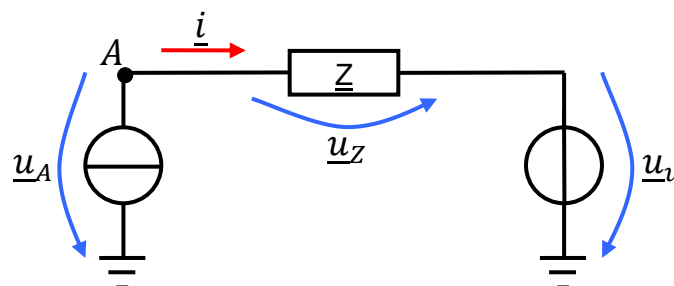


Abbildung 3: Schaltung des Prinzips der Oberschwingungskompensation

Spannungsquelle	Netzspannung mit Oberschwingungen	$\underline{u}_u = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)} + \hat{u}_{u3} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_3)}$
Impedanz \underline{Z}	Netzimpedanz (je nach Kreisfrequenz)	$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi_z} = R_u + j \cdot \omega \cdot L_u$
Punkt A	Netzanschlusspunkt der Ladesäule	$\underline{u}_A = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)}$
Stromquelle	Kompensationsstrom der Ladesäule	$\underline{i} = i \cdot e^{j(\omega_i \cdot t + \varphi_i)}$

Tabelle 8: Schaltungselement des Prinzips der Oberschwingungskompensation

Berechnung des Kompensationsstromes der dritten Oberschwingung:

$\underline{i} = \frac{\underline{u}_Z}{\underline{Z}} = \frac{\underline{u}_A - \underline{u}_u}{\underline{Z}} = \frac{-\hat{u}_{u3} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_3)}}{Z \cdot e^{j\varphi_z}} = \frac{\hat{u}_{u3}}{Z} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_3 - \varphi_z + \pi)}$			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">$i = \frac{\hat{u}_{u3}}{Z}$</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">$\omega_i = \omega_3$</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px;">$\varphi_i = \varphi_3 - \varphi_z + \pi$</td> </tr> </table>	$i = \frac{\hat{u}_{u3}}{Z}$	$\omega_i = \omega_3$	$\varphi_i = \varphi_3 - \varphi_z + \pi$
$i = \frac{\hat{u}_{u3}}{Z}$	$\omega_i = \omega_3$	$\varphi_i = \varphi_3 - \varphi_z + \pi$	

Tabelle 9: Berechnung des Kompensationsstroms

Ergebnisse der Simulation

	Parameter				Messwerte			
	Netzspannung \underline{u}_u		Netzimpedanz $R_u = 2m\Omega$ $L_u = 10\mu H$		Kompensationsstrom \underline{i}		Spannung am Netzanschlusspunkt A \underline{u}_A	
Freq	Ampl	Phase	Betrag	Winkel	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	325 V	0°	3,72 mΩ	57,5°	0,4 A	196°	325 V	0°
150 Hz	10 V	0°	9,63 mΩ	78,0°	1038 A	102°	0,01 V	50°

Tabelle 10: Ergebnis der Simulation des Prinzips der Oberschwingungskompensation

- + Die dritte Oberschwingung am Netzanschlusspunkt ist vollständig kompensiert
- Der Kompensationsstrom erreicht Werte von 1000A
- ⇒ Richtlinien begrenzen den Oberschwingungsanteil des Stromes, d.h. eine Ladesäule kann nur eine Teilkompensierung erreichen

2.2 Auswirkung des Kompensationsstromes in einem Strangnetz

Es wird untersucht, welche Wirkung ein von der Ladesäule erzeugter Kompensationsstrom auf das Netz haben kann und ob der Oberschwingungsanteil an allen Orten des Netzes reduziert wird.

Das Netz hat zwei Stränge. Jeder Strang enthält einen Spannungsteiler aus zwei Impedanzen \underline{Z} und einer Spannungsquelle. Jede Spannungsquelle erzeugt die Grundfrequenz von 50Hz und eine Oberschwingung.

2.2.1 Unterschiedliche Oberschwingungsfrequenzen

Jede Spannungsquelle erzeugt die 50 Hz Grundschwingung und unterschiedliche Oberschwingungen mit Frequenzen von 100Hz (\underline{u}_{uc}) und 150Hz (\underline{u}_{ub}).

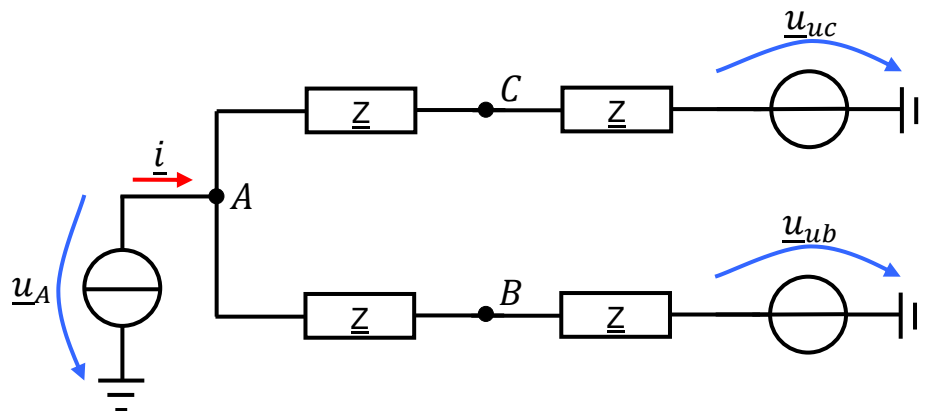


Abbildung 4: Schaltung des Kompensationsstroms eines Zwei-Strang-Netzes

Spannungsquelle	Netzspannung mit Oberschwingungen	$\underline{u}_{uc} = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)} + \hat{u}_{uc2} \cdot e^{j(\omega_2 \cdot t + \varphi_2)}$
		$\underline{u}_{ub} = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)} + \hat{u}_{ub3} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_3)}$
Impedanz \underline{Z}	Netzimpedanz (je nach Kreisfrequenz)	$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi_z} = R_u + j \cdot \omega \cdot L_u$
Punkt A	Netzanschlusspunkt der Ladesäule	$\underline{u}_A = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)}$
Stromquelle	Kompensationsstrom der Ladesäule	$\underline{i} = i_2 \cdot e^{j(\omega_2 \cdot t + \varphi_{i_2})} + i_3 \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{i_3})}$

Tabelle 11: Schaltungselement des Zwei-Strang-Netzes mit verschiedenen Oberschwingungsfrequenzen

Die Berechnung des Kompensationsstromes erfolgt wie in Tabelle 9. Die Netzimpedanz besitzt einen neuen Wert von $2 \underline{Z}$.

$$\underline{i} = \frac{\hat{u}_{uc2}}{2 \cdot \underline{Z}} \cdot e^{j(\omega_2 \cdot t + \varphi_2 - \varphi_z + \pi)} + \frac{\hat{u}_{ub3}}{2 \cdot \underline{Z}} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_3 - \varphi_z + \pi)}$$

Ergebnisse der Simulation

Parameter						
LDE 0,01%	Netzspannungen				Netzimpedanz	
	\underline{u}_{uc}		\underline{u}_{ub}		$R_u = 2m\Omega$ $L_u = 10\mu H$	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	325 V	0°	325 V	0°	3,72 mΩ	57,5°
100 Hz	6 V	0°	0 V	0°	6,59 mΩ	72,3°
150 Hz	0 V	0°	10 V	0°	9,63 mΩ	78,0°

Messwerte <u>ohne</u> Kompensation								
	Kompensations- strom		Spannung am Punkt C		Spannung am Netzanschlusspunkt A		Spannung am Punkt B	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	0 A	0°	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°
100Hz	0 A	0°	1,6 V	2,9°	3,0 V	1,2°	4,6 V	0,7°
150Hz	0 A	0°	7,5 V	0,1°	5,0 V	0,4°	2,5 V	1,2°

Messwerte <u>mit</u> Kompensation								
	Kompensations- strom		Spannung am Punkt C		Spannung am Netzanschluss- punkt A		Spannung am Punkt B	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	0,3 A	189°	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°
100Hz	455 A	108°	0,03 V	121°	0,04 V	123°	3,0 V	0,4°
150Hz	519 A	102°	5,0 V	0,9°	0,09 V	91°	0,1 V	91°

Tabelle 12: Ergebnis der Simulation der Oberschwingungskompensation eines Zwei-Strang-Netzes

- + Die Oberschwingungen am Netzanschlusspunkt A sind vollständig kompensiert
- + Die Oberschwingungen an den Netzknoten C & D sind reduziert

2.2.2 Unterschiedliche OS-Amplitude, OS-Phase und Netzimpedanz

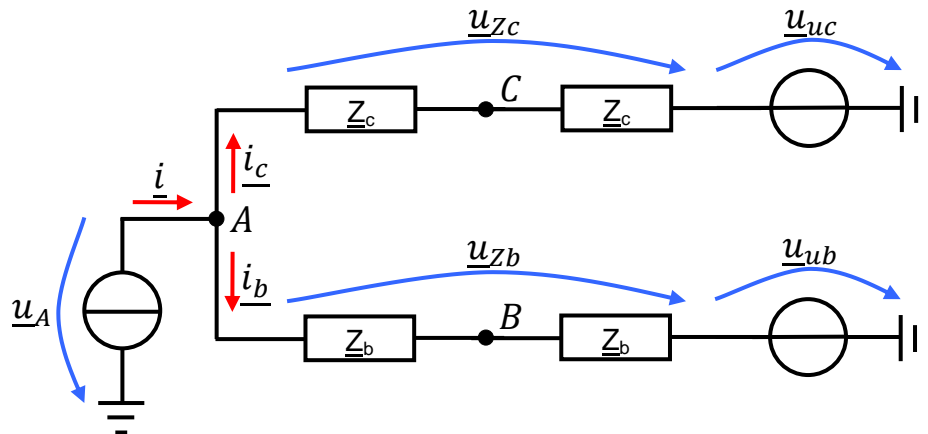


Abbildung 5: Schaltung des Kompensationsstroms eines Zwei-Strang-Netzes

Spannungsquelle	Netzspannung mit Oberschwingungen	$\underline{u}_{uc} = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)} + \hat{u}_{uc3} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{c3})}$
		$\underline{u}_{N3} = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)} + \hat{u}_{ub3} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{b3})}$
Impedanz \underline{Z}	Netzimpedanz (je nach Kreisfrequenz)	$\underline{Z}_c = Z_c \cdot e^{j\varphi_{zc}} = R_{uc} + j \cdot \omega \cdot L_{uc}$
		$\underline{Z}_b = Z_b \cdot e^{j\varphi_{zb}} = R_{ub} + j \cdot \omega \cdot L_{ub}$
Punkt A	Netzanschlusspunkt der Ladesäule	$\underline{u}_A = 325V \cdot e^{j(\omega_1 \cdot t + \varphi_1)}$
Stromquelle	Kompensationsstrom der Ladesäule	$\underline{i} = i_3 \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{i3})} = \underline{i}_c + \underline{i}_b$

Tabelle 13: Schaltungselement des Zwei-Strang-Netzes mit verschiedener Oberschwingung Amplitude, Phase und Netzimpedanz

Berechnung des Kompensationsstroms

$\underline{i} = \underline{i}_c + \underline{i}_b$	$\underline{i}_c = -\frac{\underline{u}_{zc}}{2 \cdot \underline{Z}_c} = \frac{\hat{u}_{uc3}}{2 \cdot Z_c} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{c3} - \varphi_{zc} + \pi)}$
	$\underline{i}_b = -\frac{\underline{u}_{zb}}{2 \cdot \underline{Z}_b} = \frac{\hat{u}_{ub3}}{2 \cdot Z_b} \cdot e^{j(\omega_3 \cdot t + \varphi_{b3} - \varphi_{zb} + \pi)}$

Tabelle 14: Berechnung des Kompensationsstroms

Ergebnisse der Simulation

Parameter								
LDE 0,001%	Netzspannungen				Netzimpedanzen			
	\underline{u}_{uc}		\underline{u}_{ub}		$\underline{Z}_c \begin{cases} R_{uc} = 2m\Omega \\ L_{uc} = 10\mu H \end{cases}$		$\underline{Z}_b \begin{cases} R_{ub} = 7m\Omega \\ L_{ub} = 23\mu H \end{cases}$	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Betrag	Winkel	Betrag	Winkel
50 Hz	325 V	0°	325 V	0°	3,72 mΩ	57,5°	10,0 mΩ	45,9°
150 Hz	3 V	80°	10 V	0°	9,63 mΩ	78,0°	22,8 mΩ	72,1°

Messwerte <u>ohne</u> Kompensation								
	Kompensationsstrom		Spannung am Punkt C		Spannung am Netzanschlusspunkt A		Spannung am Punkt B	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	0 A	0°	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°
150Hz	0 A	0°	6,8 V	9,5°	4,1 V	34°	3,3 V	53°

Messwerte <u>mit</u> Kompensation								
	Kompensationsstrom		Spannung am Punkt C		Spannung am Netzanschlusspunkt A		Spannung am Punkt B	
Freq	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase	Ampl	Phase
50 Hz	0,3 A	189°	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°
150Hz	302 A	138°	5,0 V	0,14°	0,02 V	63°	1,5 V	79,8°

Tabelle 15: Ergebnis der Simulation der Oberschwingungskompensation eines Zwei-Strang-Netzes

- + Die Oberschwingungen am Netzanschlusspunkt A sind vollständig kompensiert
- + Die Oberschwingungen an den Netzknoten C & D sind reduziert

Zusammenfassung

Die drei simulierten Beispiele zeigen positive Ergebnisse für die Kompensation der Spannungsoberwellen, daher ist die vollständige Kompensation für alle Oberschwingungstypen und Netztopologie möglich. Mit der Erzeugung eines Kompensationsstroms reduziert die Ladesäule die Spannungsoberschwingungen und verbessert damit die Spannungsqualität im gesamten Netz. Eine Ladesäule kann häufig nur einen Teil der Spannungsoberschwingungen kompensieren, verstärkt wird die Wirkung durch mehrere Ladesäulen.

3 Überwachung der Netzfrequenz

Die Netzfrequenz ist ein wichtiger Kennwert des Netzes. Bei der Oberschwingungsanalyse der Netzspannung definiert die Netzfrequenz die Grundfrequenz.

3.1 Schwankungsbereich der Netzfrequenz

Die Frequenz des Verteilungsnetzes in Europa besitzt einen Sollwert von 50 Hz. Die Abweichung der Netzfrequenz ist in der Norm EN 50160 wie folgt festgelegt. [HTWD12]

- 50Hz \pm 1% (d. h. 49,5 bis 50,5 Hz) während 99,5 % des Jahres
- 50Hz +4% / - 6% (d. h. 47 Hz bis 52 Hz) während 100 % der Zeit

In Tabelle 16 sind die Abweichungen der Netzfrequenz für ein Kraftwerk klassifiziert

<i>von 49,98 Hz bis 50,02 Hz</i>	Normalbetrieb
<i>von 49,8 Hz bis 50,2 Hz</i>	Normalbetrieb – Primärregelung aktiviert
<i>von 49,2 Hz bis 50,8 Hz</i>	kurzfristig erlaubt – Stufe 1 - Alarmierung des Personals
<i>ab 49 Hz</i>	Fehler im Netz – Stufe 2 bis 4 - Lastabwurf
<i>unter 47,5 Hz und über 51,5 Hz</i>	Stufe 5 - Abtrennen aller Kraftwerke vom Netz

Tabelle 16: Abweichung der Netzfrequenz [NEFEM12], [VDN12]

Anhand der Sekundenwerte einer Beispielmessung der Netzfrequenz am 8. März 2011, wurde die Häufigkeit der Schwankungen der Netzfrequenz dargestellt. Diese Messreihe von einer Stunde dient als Orientierungsbeispiel.

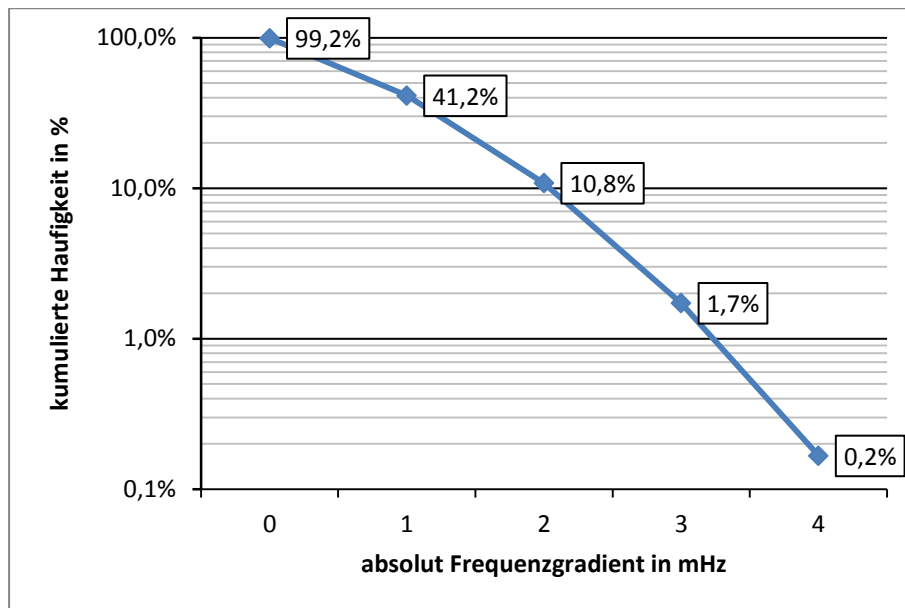


Abbildung 6: Kumulierte Häufigkeit der absoluten Schwankungen des Sekundenwerts der Netzfrequenz [NEFEM12]

Im normalen Betrieb tritt eine Änderung der Netzfrequenz von mehr als 4 mHz in einer Sekunde mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,2% auf (Abbildung 6). Im Extremfall können Schwankungen der Netzfrequenz wie in Abbildung 7 auftreten.

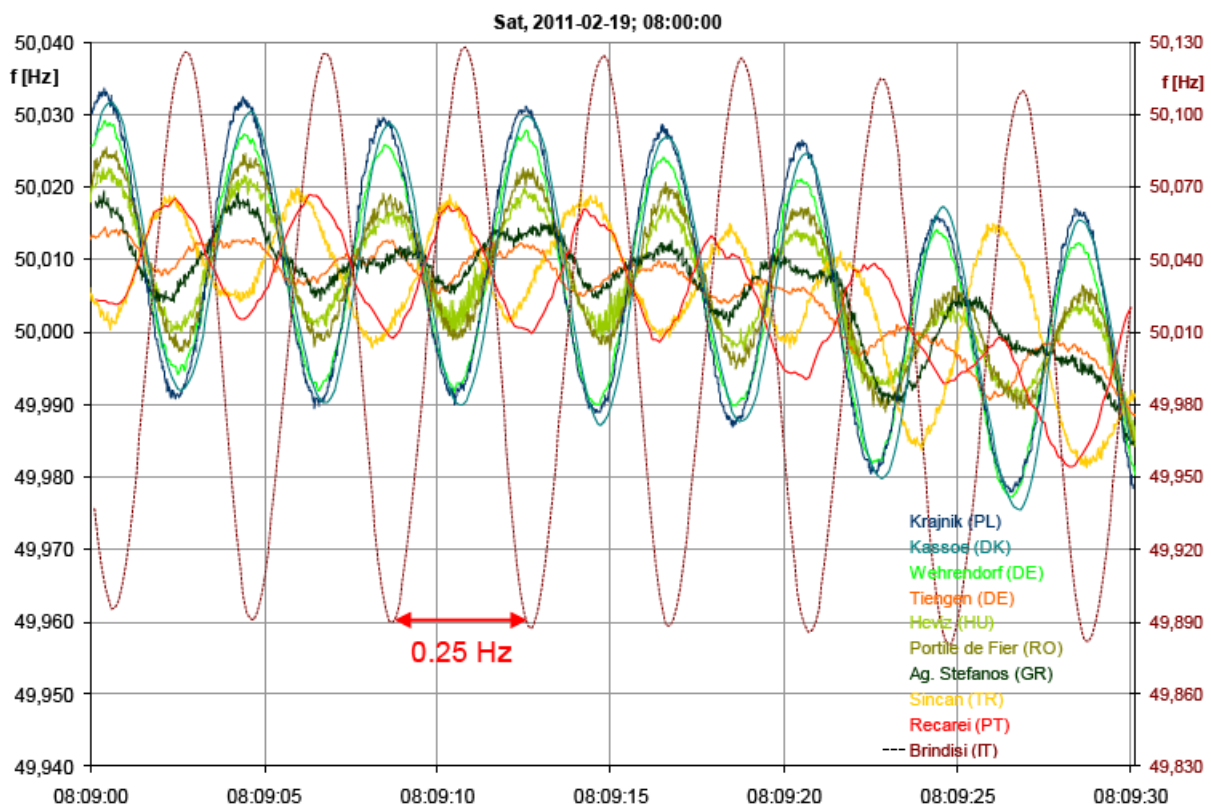


Abbildung 7: Extremfall von Schwankungen der Netzfrequenz in dem europäischen Netz [ENTSOE12]

Am 19. Februar 2011 wurden in Brindisi (Italien) Schwankungen der Netzfrequenz von $\pm 100 \text{ mHz}$ gemessen. Diese Schwankungen wiederholten sich mit einer Frequenz von

0,25 Hz. In Deutschland waren diese Schwankungen noch mit $\pm 20 \text{ mHz}$ zu spüren. Dieser Extremfall von Netzfrequenzschwankungen wurde 10 Minuten lang im europäischen Netz gemessen

3.2 Messverfahren zur Ermittlung der Netzfrequenz im Verteilernetz

Die Netzspannung wird mit einem Schmitt-Trigger in ein Rechtecksignal umgewandelt. Die Hysterese des Schmitt-Triggers garantiert die Stabilität gegen Spannungsschwankungen. Das Rechtecksignal steuert den Zähler eines Mikrocontrollers an. Für die Dauer zwischen zwei Flanken des Rechtecksignals wird mit der internen Taktfrequenz des Mikrocontrollers ein Zähler hochgezählt. Die genaue Frequenz des Oszillators wird von der Umgebungstemperatur beeinflusst. Diese Schwankungen können mit der vom Zeitsignalsender DCF77 übertragenen Atomzeit korrigiert werden [NEFEM12].

Aus der digitalisierten Netzspannung kann die Netzfrequenz auch ermittelt werden. Die Genauigkeit ist dann von der Abtastfrequenz des A/D-Wandlers abhängig. Bei 200 kHz Abtastfrequenz beträgt die Auflösung 12,5 mHz. Durch eine Interpolation der Netzspannung zwischen zwei Samples wird der Messfehler reduziert.

4 Frequenzanalyse

Die Analyse der Harmonischen, die in den Netzspannungen und Netzströmen enthalten sind, ist ein wichtiger Teil der Oberschwingungskompensation. Um die Oberschwingungen der Netzspannung zu reduzieren, müssen sie gemessen werden. Dies erfolgt mit der Fourier-Reihenentwicklung der Netzspannungen und Netzströme.

4.1 Fourier-Reihen

In den folgenden Betrachtungen werden die Netzspannungen und die Netzströme mit dem allgemeinen Signal $x(t)$ bezeichnet. Die Netzspannungen und die Netzströme sind periodische Signale der Periode T und können durch eine Summe von Sinusfunktionen dargestellt werden.

$x(t) = x_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (\hat{x}_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k))$	
k	Ordnung der Oberschwingung
$k\omega = \frac{2\pi \cdot k}{T}$	Kreisfrequenz der k -ten Oberschwingung
\hat{x}_k	Amplitude der k -ten Oberschwingung
φ_k	Phase der k -ten Oberschwingung

Tabelle 17: Zerlegung eines periodischen Signals in eine Fourier-Reihe

Die komplexe Form der Fourier-Reihen Entwicklung:

$F\{x(t)\} = \underline{\hat{x}}_k = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (x(t) \cdot e^{-jk\omega t}) dt$	
$\underline{\hat{x}}_k = \hat{x}_k \cdot e^{j\varphi_k}$	k -te Oberschwingung
$x(t)$	Eingangssignal
$e^{-j\omega t}$	rotierende Einheitszeiger

Tabelle 18: Hintransformation der Fourier-Reihenentwicklung

Die Fourier-Reihenentwicklung erfolgt in zwei Schritten:

- 1) In Tabelle 18 wird das Eingangssignal mit dem Einheitszeiger multipliziert (blau). Dieses entspricht einer Verschiebung des Eingangssignals im Frequenzbereich. Ein Beispiel in Tabelle 19 erläutert die Berechnung der Grundfrequenz aus den Oberschwingungen der Netzspannung.
Das Eingangssignal hat zwei Harmonische ($k = 1; k = 3$). Für die Berechnung der Fourier-Koeffizienten der Grundfrequenz ($k = 1$) muss der Einheitszeiger mit der Kreisfrequenz ω rotieren. Die Multiplikation des Eingangssignals mit dem Einheitszeiger ergibt im komplexen Frequenzbereich eine Verschiebung des Spektrums des Eingangssignals nach links um die Grundfrequenz ω . Die Grundfrequenz des Signals (lila) ist nach der Multiplikation ein Gleichanteil ($k = 0$) geworden.

Eingangssignal $x(t) = \hat{x}_1 \cdot \cos(\omega t) + \hat{x}_3 \cdot \cos(3\omega t)$	Verschiebung um die Grundfrequenz
$\underline{x}(t) = \frac{\hat{x}_1}{2} \cdot (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) + \frac{\hat{x}_3}{2} \cdot (e^{j3\omega t} + e^{-j3\omega t})$	$\underline{x}(t) \cdot e^{-j\omega t} = \frac{\hat{x}_1}{2} \cdot (1 + e^{-j2\omega t}) + \frac{\hat{x}_3}{2} \cdot (e^{j2\omega t} + e^{-j4\omega t})$

Tabelle 19: Verschiebung des Frequenzspektrums

- 2) In Tabelle 18 wurde der Mittelwert für eine Periode T des Eingangssignals nach seiner Frequenzverschiebung berechnet (rot). Die Berechnung des Mittelwertes eines Signals ergibt die Amplitude des Gleichanteils. Dieser Gleichanteil entspricht der Amplitude der Grundfrequenz des ursprünglichen Eingangssignals (Formel 1).

$$\underline{X}_1 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(\frac{\hat{x}_1}{2} \cdot (1 + e^{-j2\omega t}) + \frac{\hat{x}_3}{2} \cdot (e^{j2\omega t} + e^{-j4\omega t}) \right) dt = \frac{\hat{x}_1}{2}$$

Formel 1: Berechnungsbeispiel des Komplexen Fourierkoeffizienten

Das Ergebnis der Fourier-Reihenentwicklung ist ein komplexer Fourier-Koeffizient. Die Berechnung des reellen Fourier-Koeffizienten ergibt die Amplitude und Phase der Grundfrequenz. Die Phase muss für eine Sinusfunktion angepasst werden, indem $\pi/2$ addiert wird.

Amplitude	$\hat{x}_1 = 2 \cdot \underline{\hat{x}}_1 = \underline{\hat{x}}_1 + \underline{\hat{x}}_{-1} $
Phase (für Sinusfunktion)	$\varphi_1 = \arg(\underline{\hat{x}}_1) + \frac{\pi}{2}$

Formel 2: Zusammenhang zwischen reellen und komplexen Fourier-Koeffizienten

Die Messsignale der Netzspannungen und Netzströme sind digital. Die Fourier-Reihenentwicklung wird im diskreten Zeitbereich durchgeführt.

4.2 Diskrete Fourier Transformation (DFT)

Die Oberschwingungsanalyse der Netzspannungen und Netzströme soll mit der diskreten Fourier-Transformation auf einem digitalen Prozessor realisiert werden.

Die Netzspannungen und die Netzströme sind periodische Signale von Periode T und mit einer Taktfrequenz f_s digitalisiert. In den folgenden Betrachtungen sind diese mit dem allgemeinen diskreten Eingangssignal x_n bezeichnet.

$F\{x_n\} = \hat{x}_k = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left(x_n \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \right)$	
k	Ordnung der Oberschwingung
n	Samplenummer in einer Periode
f_s	Taktfrequenz des Eingangssignals bzw. Wandlungsfrequenz des AD- Wandlers
$N = f_s \cdot T$	Anzahl der Sample in einer Periode T
$\frac{2\pi \cdot k}{N}$	diskrete Kreisfrequenz
x_n	diskretes Eingangssignal
\hat{x}_k	k -te Oberschwingung
$e^{-j2\pi \frac{k}{N} n}$	Einheitszeiger

Tabelle 20: Hintransformation der diskreten Fourier Transformation

Die DFT analysiert immer eine Periode $T = 20ms$ des Signals. Das Signal $x(t)$ wird innerhalb einer Periode in N diskrete Werte (x_0 bis x_n) digitalisiert. Die zwei Berechnungsschritte der Fourier-Reihenentwicklung werden für die DFT entsprechend ausgeführt.

- 1) In Tabelle 20 wird die Verschiebung im Frequenzbereich (blau) dargestellt: Multiplikation des Eingangssignals mit dem Einheitszeiger. Im Beispiel der Abbildung 8 ist das Eingangssignal mit $N = 16$ Sample pro Periode T digitalisiert. Die Rotation der Einheitszeiger für eine Periode T mit der Grundfrequenz ($k = 1$) ergibt 16 diskrete Punkte ($n = 0 \dots 15$), die gleichmäßig auf der Eulerschen Ebene verteilt sind. Der Einheitszeiger rotiert dabei diskret von Punkt zu Punkt. Jeder Eingangswert x_n wird mit dem entsprechenden Einheitszeiger $e^{-j2\pi \frac{k}{N} n}$ multipliziert, wie in Formel 3 aufgeführt.

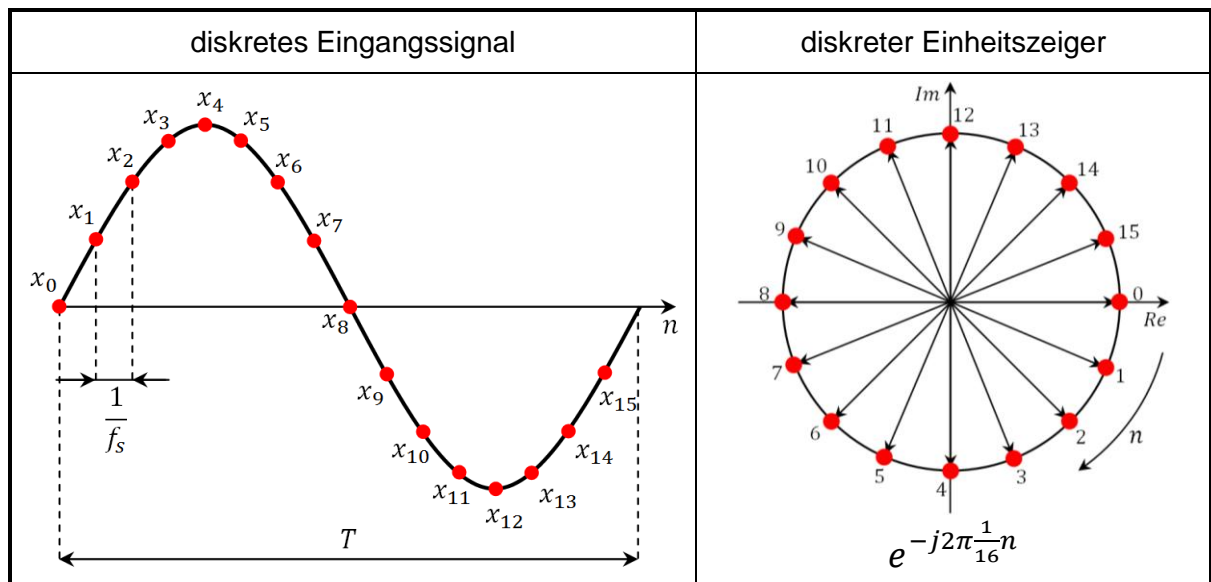


Abbildung 8: Beispiel DFT: diskretes Eingangssignal und diskreter Einheitszeiger bei N=16

- 2) Tabelle 20: Berechnung des Gleichanteils (rot). Der Mittelwert eines diskreten periodischen Signals ist die Summe aller N Werte einer Periode (x_0 bis x_n) dividiert durch ihre Anzahl N .

$$\hat{x}_0 = \frac{1}{N} \cdot (x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{N-1})$$

$$\hat{x}_1 = \frac{2}{N} \cdot (x_0 \cdot e^{-j2\pi \frac{1}{N} 0} + x_1 \cdot e^{-j2\pi \frac{1}{N} 1} + \dots + x_{N-1} \cdot e^{-j2\pi \frac{1}{N} (N-1)})$$

Formel 3: Berechnungsbeispiel der Fourierkoeffizienten mit der DFT

4.3 DFT in Portunus

4.3.1 Für eine Periode

Die Simulationssoftware Portunus kann keine Berechnung mit Komplexen-Zahlen durchführen, um die DFT trotzdem umsetzen zu können, werden der reale und imaginäre Anteil separat berechnet.

Komplexer Koeffizient	$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \left(\cos\left(2\pi \frac{k}{N} n\right) - j \cdot \sin\left(2\pi \frac{k}{N} n\right) \right)$
Real-Anteil	$Re\{\hat{x}_k\} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \cos\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)$
Imaginär-Anteil	$Im\{\hat{x}_k\} = -\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \sin\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)$

Tabelle 21: Zerlegung des komplexen Koeffizienten der DFT

Aus dem Koeffizienten \hat{x}_k lässt sich die Amplitude und die Phase jeder Oberschwingung berechnen.

Amplitude $k > 0$	$\hat{x}_k = 2 \cdot \sqrt{(Re\{\hat{x}_k\})^2 + (Im\{\hat{x}_k\})^2}$
Phase	$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{Im\{\hat{x}_k\}}{Re\{\hat{x}_k\}} \right) + \varphi_{Korr}$

Tabelle 22: Amplitude und Phase Notation

Mit dem Korrekturwinkel φ_{Korr} erfolgt die Anpassung der Phase des DFT-Koeffizienten für die Sinus-Funktion und verläuft dann im Wertebereich des Winkels zwischen 0 bis 2π .

$Re\{\hat{x}_k\}$	$Im\{\hat{x}_k\}$	$\tan^{-1} \left(\frac{Im\{\hat{x}_k\}}{Re\{\hat{x}_k\}} \right)$	φ_k	φ_{Korr}
+	−	$-\pi/2 < < 0$	$0 < < \pi/2$	$\pi/2$
+	+	$0 < < \pi/2$	$\pi/2 < < \pi$	$\pi/2$
−	+	$-\pi/2 < < 0$	$\pi < < 3\pi/2$	$3\pi/2$
−	−	$0 < < \pi/2$	$3\pi/2 < < 2\pi$	$3\pi/2$

Tabelle 23: Berechnung des Korrekturwinkels der DFT

4.3.2 Gleitende DFT

Die Berechnung der DFT ist synchronisiert mit der Abtastung des zu analysierenden Eingangssignals. Die Netzspannungen und Netzströme werden in Echtzeit digitalisiert. Mit jedem neuen Eingangssample x_n erfolgt eine neue Berechnung der DFT. Die Summation aller N Werte einer Periode T wird nicht für jede Abtastperiode wiederholt, sondern entsprechend des Analysefensters der DFT fällt der älteste Wert (orange) aus der gleitenden Mittelwertbildung und der neue Wert x_n (grüner Punkt, Abbildung 9) kommt hinzu. Bei jedem neuen Eingangswert verschieben sich die Werte im Ringspeicher die zur Berechnung des gleitenden Mittelwertes genutzt werden.

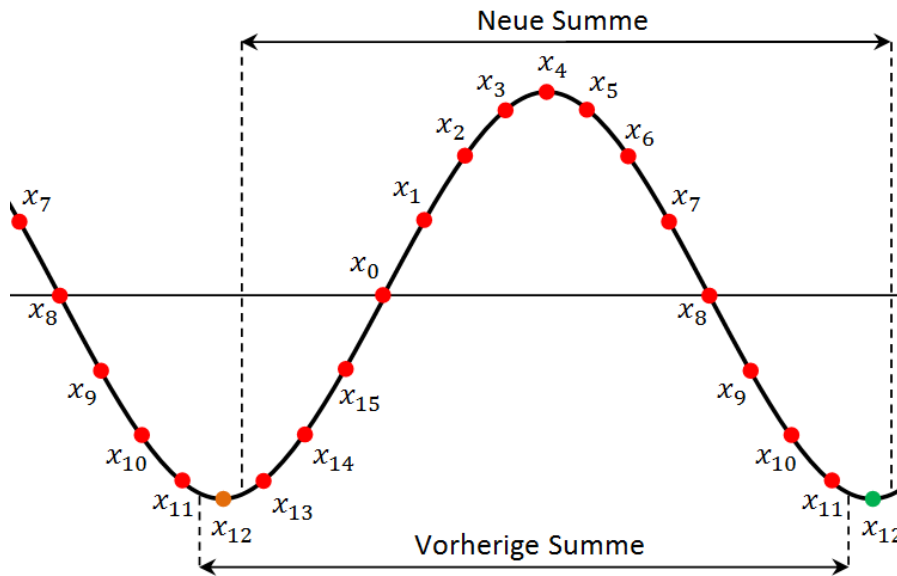


Abbildung 9: gleitende DFT

Ein synchronisierter Zähler berechnet die Samplenummer n .

n ist nach jeder Abtastperiode von +1 inkrementiert und verläuft von 0 bis $N = T \cdot f_s$

$$n = (t \cdot f_s) \% (T \cdot f_s)$$

Ein Delay von einer Periode T des Eingangssignals $x(t)$ bzw. x_n ergibt den „alten“ Wert $x(t - T)$ bzw. x_{n-N} . Für Jede Abtastperiode ist der Real- und Imaginär-Teil des Fourier-Koeffizienten neu zu berechnen.

$$\begin{aligned}
 \text{Re}\{\hat{x}_k\} &= \underbrace{\text{Re}\{\hat{x}_k\}_{n-1}}_{\substack{\text{Summe vom} \\ \text{letzte Abtastperiode}}} + \underbrace{x_n \cdot \cos\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)}_{\text{neuer Wert}} - \underbrace{x_{n-N} \cdot \cos\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)}_{\text{Delay Wert}} \\
 \text{Im}\{\hat{x}_k\} &= \underbrace{\text{Im}\{\hat{x}_k\}_{n-1}}_{\substack{\text{Summe vom} \\ \text{letzte Abtastperiode}}} - \underbrace{x_n \cdot \sin\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)}_{\text{neuer Wert}} + \underbrace{x_{n-N} \cdot \sin\left(2\pi \frac{k}{N} n\right)}_{\text{Delay Wert}}
 \end{aligned}$$

Formel 4: real und imaginär Anteil der gleitende DFT

Die daraus folgende Amplitude und Phase wird mit Hilfe der Formel 5 berechnet.

Amplitude $k > 0$	$\hat{x}_k = \frac{2}{N} \cdot \sqrt{(Re\{\hat{x}_k\})^2 + (Im\{\hat{x}_k\})^2}$
Phase	$\varphi_k = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{Im\{\hat{x}_k\}}{Re\{\hat{x}_k\}}\right) + \frac{\pi}{2} & (Re\{\hat{x}_k\} \geq 0) \\ \tan^{-1}\left(\frac{Im\{\hat{x}_k\}}{Re\{\hat{x}_k\}}\right) + \frac{\pi}{2} + \pi & (Re\{\hat{x}_k\} < 0) \end{cases}$

Formel 5: Amplitude und Phase der gleitende DFT

4.4 Simulationsergebnisse

4.4.1 Statische Genauigkeit

Die Prüfung der Genauigkeit der DFT erfolgte in der Simulation anhand der Methode des Parameter-Sweep. Die Parameter werden dabei während einer Simulation konstant gehalten. Es erfolgen mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametersätzen. Dabei ist zu untersuchen, ob die Istwerte des AD-Wandlers synchron zur Berechnung vorliegen und ob der Algorithmus der DFT damit genaue Ergebnisse liefern kann.

4.4.1.1 Taktfrequenz des AD-Wandlers

Die maximale Wandlungsfrequenz des AD-Wandlers liegt bei 200kHz. Mit dieser Frequenz werden 8 Kanäle mit einer Auflösung von 16 Bit gewandelt. Für die 40. Oberschwingung (2000Hz) ergeben sich bei der maximalen Wandlungsfrequenz 100 Samples pro Periode, was zu einer genügend hohen Auflösung und Genauigkeit führt.

4.4.1.2 Simulationsschrittweite, lokale Diskretisierungsfehler

Das Prüfsignal enthält die 50Hz, 325V Grundschiwingung, die 3. und 40. Oberschwingung. In der Simulation soll geprüft werden, welche Genauigkeit erreichbar ist, wenn die Istwerte und das Fortschreiten des Einheitszeigers der DFT nicht synchron zueinander erfolgen. Mit der Simulationsschrittweite H_{MIN} und H_{MAX} kann die Synchronität erzwungen und deren Einfluss dargestellt werden. Dafür wurden die benachbarten Oberschwingungen 2., 3., 39. und 40. Oberschwingung ausgewertet. So wird untersucht, ob neben den erwarteten OS auch Anteile berechnet werden, die fälschlicher Weise den benachbarten OS zugeordnet werden.

Der lokale Diskretisierungsfehler stellt die Genauigkeit der Simulation ein und bildet mit einem geringen $LDE < 0,01\%$ die Realität sehr gut ab. Die Genauigkeit des DFT-Algorithmus wird davon aber nicht beeinflusst.

Messung Nr. →		Referenz	1	2	3	4
Taktfrequenz f_s		-	10kHz	10kHz	100kHz	100kHz
H _{MIN}		-	2μs	1μs	1μs	1μs
H _{MAX}		-	2μs	1μs	1μs	1μs
LDE		-	1%	1%	1%	0,01%
100Hz	Ampl	0 V	0,037 V	0,028 V	0,028 V	0,028 V
150 Hz	Ampl	10 V	9,975 V	10,003 V	10,003 V	10,003 V
	Phase	0°	0,180°	0,142°	0,146°	0,146°
1950 Hz	Ampl	0 V	0,024 V	0,017 V	0,017 V	0,017 V
2000 Hz	Ampl	5 V	4,998 V	4,999 V	4,999 V	4,999 V
	Phase	0°	1,813°	1,147°	1,154°	1,154°

Tabelle 24: Einfluss der Taktfrequenz, der Simulationsschrittweite und des lokalen Diskretisierungsfehlers auf die Genauigkeit der DFT

- Die Taktfrequenz f_s hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit der DFT
- Kleinere Simulationsschrittweiten H_{MIN} und H_{MAX} verbessern die Genauigkeit der DFT, weil die Istwert-Erfassung und die fortschreitende Lage des Einheitszeigers der DFT synchron zueinander liegen
- Der lokale Diskretisierungsfehler LDE hat keinen Einfluss auf der Genauigkeit der DFT

4.4.1.3 Abweichung der Netzfrequenz

- Berechnung der Amplitude und Phase der Grundschiwingung bei einer Abweichung der Netzfrequenz

Die Frequenz der Grundschiwingung ist ein Parameter der DFT. Er muss vor der Berechnung der DFT festgelegt werden und bleibt während der Berechnung der gleitenden DFT konstant. Im normalen Betrieb kann die Frequenz der Netzspannung bis zu $\pm 200\text{mHz}$ vom 50Hz Sollwert abweichen [NEFEM12]. Eine genaue Übereinstimmung der Frequenzen des Netzes f_N und des DFT Parameters f_D wäre reiner Zufall. Im Normalfall wird immer eine Differenz Δf zwischen beiden Frequenzen auftreten. Dies führt zu einer Ungenauigkeit der Berechnung der Fourier-Koeffizienten.

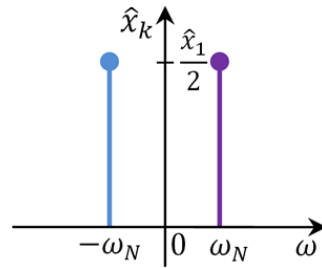
$$\Delta f = f_N - f_D \quad \Delta \omega = \omega_N - \omega_D$$

Die Berechnungsschritte der Fourier-Transformation für die Grundschiwingung werden in Tabelle 25 neu betrachtet.

Eingangssignal

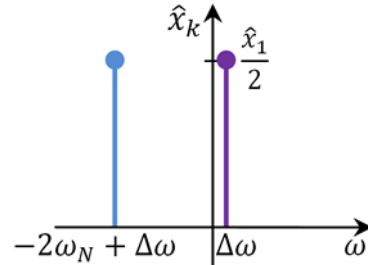
$$x(t) = \hat{x}_1 \cdot \cos(\omega_N \cdot t)$$

$$\underline{x}(t) = \frac{\hat{x}_1}{2} \cdot (e^{j\omega_N t} + e^{-j\omega_N t})$$



Verschiebung um die DFT Frequenz f_D

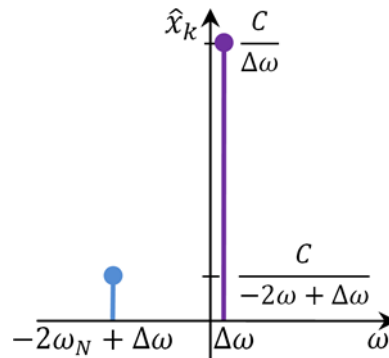
ergibt keinen Gleichanteil (0 Hz) wie es in Tabelle 19 der Fall war, sondern eine Schwingung mit der Kreisfrequenz $\Delta\omega$



$$\underline{x}(t) \cdot e^{-j\omega_D t} = \frac{\hat{x}_1}{2} \cdot (e^{j\Delta\omega t} + e^{j(-2\omega_N + \Delta\omega)t})$$

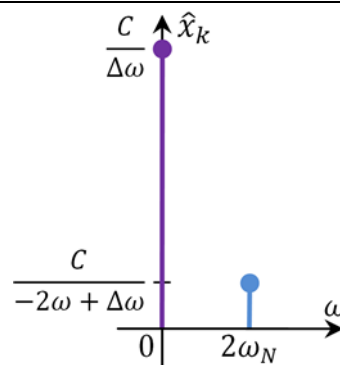
Mittelwert von einer Periode T_D des verschobenen Signals erhöht die Amplitude der $\Delta\omega$ Schwingung

$$\varphi_\Delta = 2\pi \cdot \frac{\Delta f}{f_D} ; C = j \frac{\hat{x}_1}{T_D} (e^{j\varphi_\Delta} - 1)$$



$$\frac{2}{T_D} \cdot \int_t^{t+T_D} (\underline{x}(t) \cdot e^{-j\omega_D t}) dt = \left(\frac{C}{\Delta\omega} \cdot e^{j\Delta\omega t} + \frac{C}{-2\omega_N + \Delta\omega} \cdot e^{j(-2\omega_N + \Delta\omega)t} \right)$$

Amplitude des Fourier-Koeffizienten im Originalbereich durch Rücktransformation des zweiseitigen Spektrums ins einseitige Spektrum. Die Amplitude ist eine Gleichgröße mit einem Schwingungsanteil mit doppelter Netzfrequenz



$$\left| \frac{2}{T_D} \cdot \int_t^{t+T_D} (\underline{x}(t) \cdot e^{-j\omega_D t}) dt \right| = \frac{|C|}{\Delta\omega} + \frac{|C|}{-2\omega_N + \Delta\omega} \cdot \cos(2\omega_N \cdot t)$$

Tabelle 25: Amplituden Spektrum der DFT-Berechnungsschritte bei einer Abweichung der Netzfrequenz Δf

In Abbildung 10 sind die DFT-Ergebnisse der Amplitude und der Phase dargestellt. Die Amplitude ist eine Gleichgröße, überlagert mit einem Schwingungsanteil doppelter Netzfrequenz. Der Differenzwinkel zwischen den Zeigern der Netz- und Analysefrequenz wird durch einen Phasenwinkel mit dem Aussehen einer Rampe mit der Differenzfrequenz Δf abgebildet. Die Abweichung von der Netzfrequenz ist mit 5 Hz unrealistisch hoch gewählt, dient aber zur besseren Darstellung der Ergebnisse der DFT.

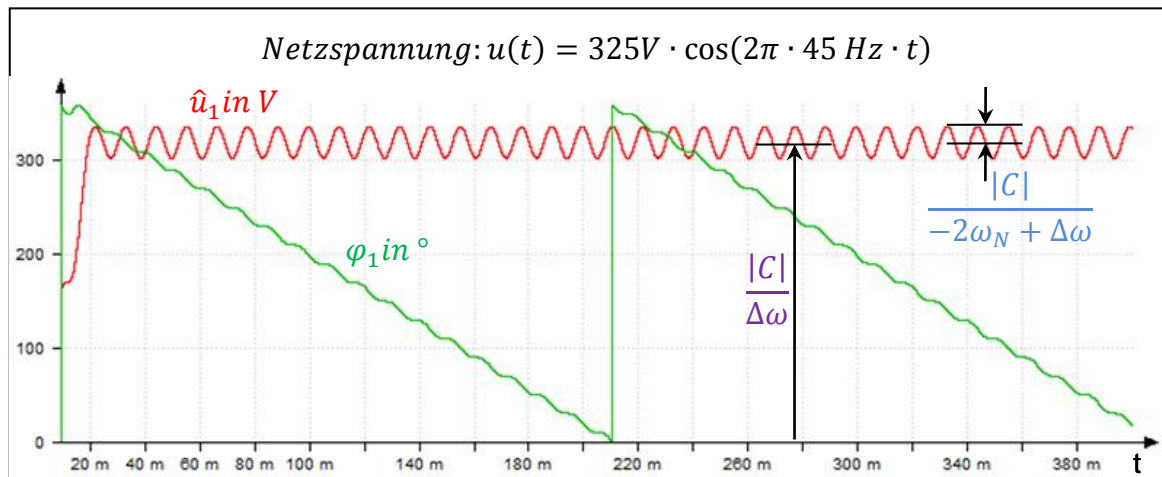


Abbildung 10: Amplitude und Phase der Fourier-Koeffizienten der Grundschwingung bei einer Netzfrequenz von 45 Hz

Im Normalbetrieb weicht die Netzfrequenz um $\Delta f = \pm 200 \text{ mHz}$ von 50 Hz ab. Die DFT-Berechnung der Netzspannung mit einer festen 50Hz Frequenz ergibt eine vernachlässigbare Abweichung der Amplitude des Fourier-Koeffizienten von der Grundfrequenz. Die Abweichung der Phase ist eine Integration der Frequenzdifferenz Δf . Eine Netzfrequenz über 50 Hz führt zu einer stetig ansteigenden Phase. Bei einer Netzfrequenz unter 50 Hz weist die Phase einen stetigen Abfall aus. Die Phase enthält die Information der korrekten Lage des realen U-Zeigers im Bezug zur festen Analyse-Frequenz der DFT. Dieser Phasenwinkel läuft von 0° bis 360° mit einer Periode, die abhängig von der Schwankung der Netzfrequenz ist. Dieser Phasenwinkel wird als Istwert für die Regelung des Kompensationsstromes genutzt.

- Messung der Amplitude und Phase der Oberschwingungen bei einer Abweichung der Netzfrequenz

Dieselben Abweichungen treten bei der Messung der Oberschwingungen auf. Die Analysefrequenz der DFT wird mit der Ordnungszahl der Oberschwingungen multipliziert, damit lassen sich Amplitude und Phasenlage der jeweiligen Oberschwingung berechnen.

$$\Delta f_k = f_N - k \cdot f_D \quad \Delta \omega_k = \omega_N - k \cdot \omega_D$$

Das Eingangssignal ist wie in Tabelle 25 abgebildet, eine Cosinus-Funktion mit einer Frequenz von 45Hz. Die Berechnung der zweiten Oberschwingung (100Hz) ergibt die in Abbildung 11 dargestellte Amplitude und Phase. Die Amplitude enthält einen Gleichanteil

und Schwingungen mit doppelter, vierfacher, sechsfacher Netzfrequenz. Die Phase der Oberschwingung ist eine Rampe der Frequenz Δf_k mit einer „Stufe“ mit doppelter Netzfrequenz.

$$\hat{x}_k = \frac{|C|}{\Delta\omega_k} + \frac{|C|}{-2\omega_N + \Delta\omega_k} \cdot \cos(2\omega_N \cdot t) + \dots$$

$$\text{mit } C = j \frac{\hat{x}_1}{T_D} (e^{j\varphi_{\Delta k}} - 1) \quad ; \quad \varphi_{\Delta k} = 2\pi \cdot \frac{\Delta f_k}{k \cdot f_D}$$

Tabelle 26: DFT-Auswertung der Oberschwingungsamplitude bei Netzfrequenzabweichung

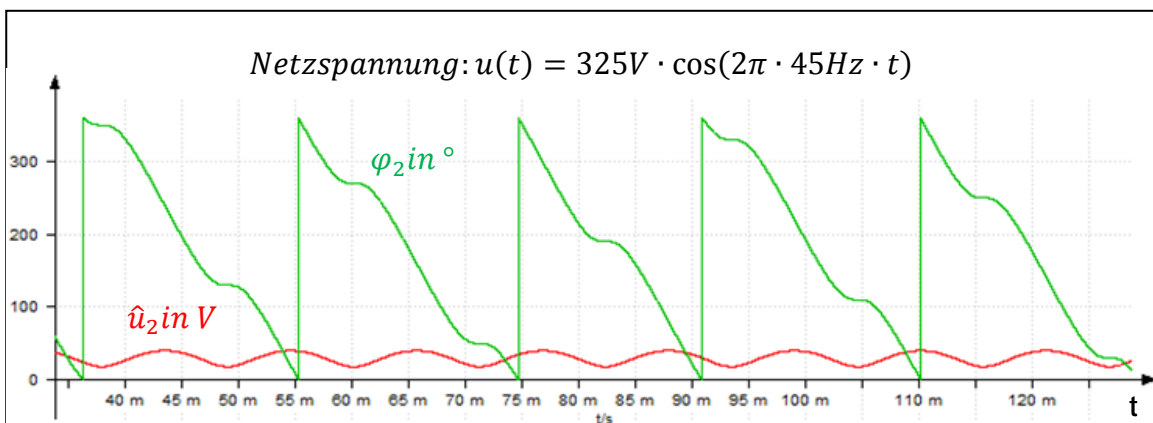


Abbildung 11: Amplitude und Phase des Fourier-Koeffizienten der zweiten Oberschwingung bei einer Netzfrequenz von 45 Hz

Eine Abweichung von der Netzfrequenz um 200 mHz führt, wie in Tabelle 27 dargestellt, zur Berechnung von Amplituden nicht vorhandener Oberschwingungen. Obwohl die Netzspannung eine reine Sinusfunktion mit einer Frequenz von $f_N = 50,2 \text{ Hz}$ ist und damit keine Oberschwingung enthält, weisen alle Oberschwingung der 50Hz DFT-Berechnung Amplituden auf. Diese falsch berechneten Amplituden der Oberschwingungen sind im Verhältnis zu den Grenzwerten vernachlässigbar.

Netzspannung: $u(t) = 325V \cdot \cos(2\pi \cdot 50,2\text{Hz} \cdot t)$					
$f_D = 50 \text{ Hz}$ $f_N = 50,2 \text{ Hz}$		2. OS \hat{u}_2	3. OS \hat{u}_3	10. OS \hat{u}_{10}	20. OS \hat{u}_{20}
Frequenz Inhalt jede OS	0 Hz	1,3 V	0,7 V	0,17 V	0,08 V
	$2f_N$	0,4 V	0,3 V	0,10 V	0,05 V
	$4f_N$	0,04 V	0,04 V	0,017 V	0,01 V
	$6f_N$	0,005 V	0,009 V	0,007 V	0,004 V

Tabelle 27: Messung von Oberschwingungen, die nur durch die Abweichung von der Netzfrequenz berechnet werden

Wird die DFT-Auswertung der Netzspannung bei einer Grundschiwingung von 50,2Hz und einer Oberschiwingung von 10V bei 150,6Hz (vergleiche Tabelle 27 & Tabelle 28) durchgeführt, ist das Verhältnis von vorhandener und falsch berechneter Oberschiwingung interessant. Eine Abweichung von der Netzfrequenz erzeugt nach abgeschlossener DFT-Auswertung vernachlässigbare Amplituden im Vergleich zu den vorhandenen Oberschiwingungen, die korrekt abgebildet werden. Eine Kompensation von Oberschiwingung erfolgt nur dann, wenn deren Amplitude oberhalb der Grenzwerte liegt.

Netzspannung: $u(t) = 325V \cdot \cos(2\pi \cdot 50,2Hz \cdot t) + 10V \cdot \cos(2\pi \cdot 150,6Hz \cdot t)$					
$f_D = 50 Hz$ $f_N = 50,2 Hz$		2. OS \hat{u}_2	3. OS \hat{u}_3	10. OS \hat{u}_{10}	20. OS \hat{u}_{20}
Frequenz Inhalt der Amplitude	0 Hz	1,4 V	10,02 V	0,16 V	0,08 V
	$2f_N$	0,3 V	0,6 V	0,13 V	0,06 V
	$4f_N$	0,03 V	0,3 V	0,006 V	0,004 V
	$6f_N$	0,002 V	0,03 V	0,004 V	0,002 V

Tabelle 28: Messung von einer präsenten Oberschiwingung bei einer Abweichung der Netzfrequenz

Die tatsächliche Frequenz der Oberschiwingung ist selten ein Vielfaches der Netzfrequenz bzw. von 50Hz. Die Abweichung der Frequenz der Oberschiwingung führt zu ähnlichen Ergebnissen, wie in Tabelle 25 bereits erwähnt.

- Anpassung der Analyse-Frequenz der DFT mit der Netzfrequenz

Die Gleitende DFT kann nur mit einer festen Analyse-Frequenz arbeiten. Jede neue Berechnung der DFT basiert auf der Berechnung des letzten Schritts, damit muss der Einheitszeiger immer mit der gleichen Kreisfrequenz rotieren. Eine Änderung der Analyse-Frequenz der DFT bedeutet die neue Berechnung der gesamten Summe einer Netzperiode.

Die Taktfrequenz f_s des diskreten Eingangssignals legt die Auflösung der Analyse-Frequenz der DFT Δf_D fest (Tabelle 29).

f_s	10 kHz	50 kHz	200 kHz
$\Delta f_D = \frac{(50 Hz)^2}{50 Hz + f_s}$	249 mHz	50 mHz	12,5 mHz

Tabelle 29: Auflösung der Analyse-Frequenz der DFT in Abhängigkeit der Taktfrequenz

Der A/D-Wandler hat eine maximale Taktfrequenz von 200kHz, damit ist die Auflösung der DFT-Analyse-Frequenz höchstens 12,5 mHz. Mit einer optimalen Anpassung werden

die DFT-Analyse-Frequenz und die Netzfrequenz eine Differenz von maximal $\pm 6,25$ mHz haben.

4.4.2 Dynamische Genauigkeit

Das Prüfsignal $x(t)$ ändert seine Amplitude \hat{x} und Phase φ während der Simulation.

$$x(t) = \hat{x} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

Die DFT ist ein Mittelwert. In Abbildung 12 ist das Ergebnis der DFT dann korrekt, wenn das Eingangssignal während der letzten Periode eine konstante Amplitude und Phase hatte. Die Zeitverzögerung ist durch die gleitende Mittelwertbildung begründet.

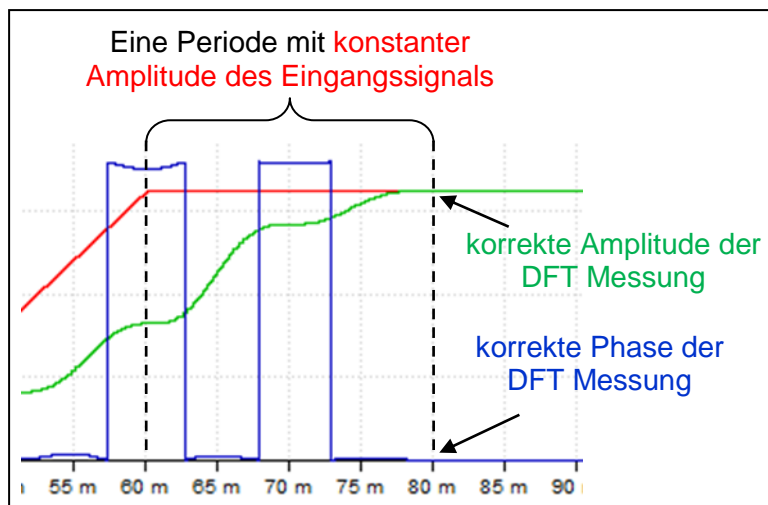


Abbildung 12: DFT ist ein Mittelwert

In den folgenden Abbildungen wird das Eingangssignal (grün) mit der Hin- und Rücktransformation mit der gleitenden DFT (blau) verglichen. In Rot ist die Amplituden- oder Phasen-Änderung des Eingangssignals dargestellt.

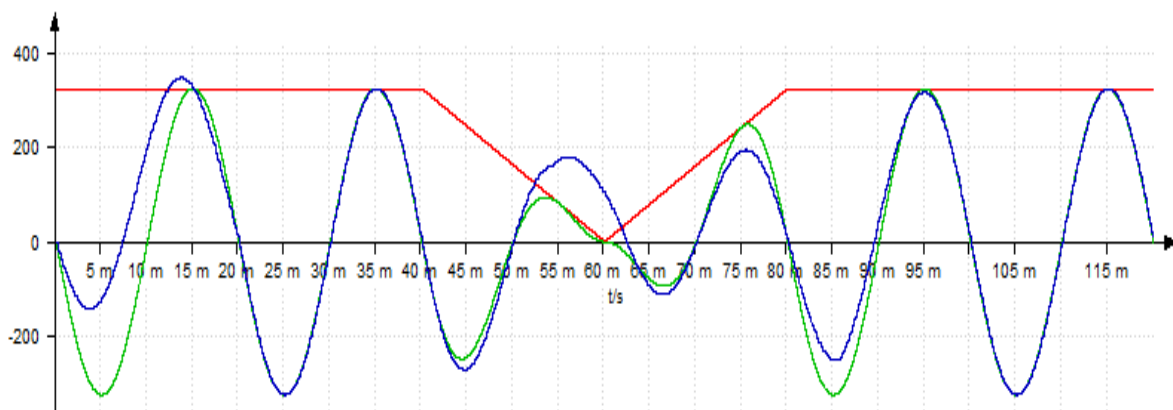


Abbildung 13: Korrekte Abbildung des Ist-Signals nach 20ms, nach einer schnellen Amplitudenänderung

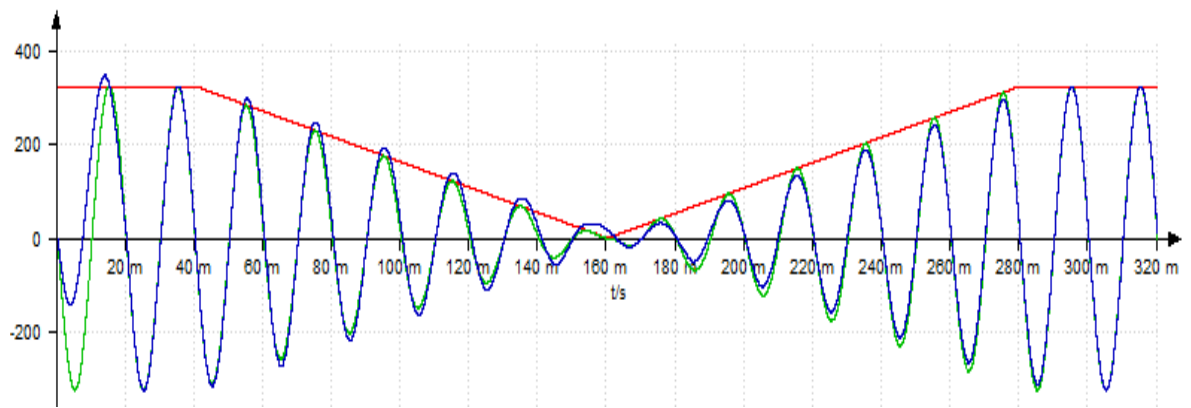


Abbildung 14: Wiederherstellung des Signals ($k=0...39$), Amplituden Änderung (240 ms)

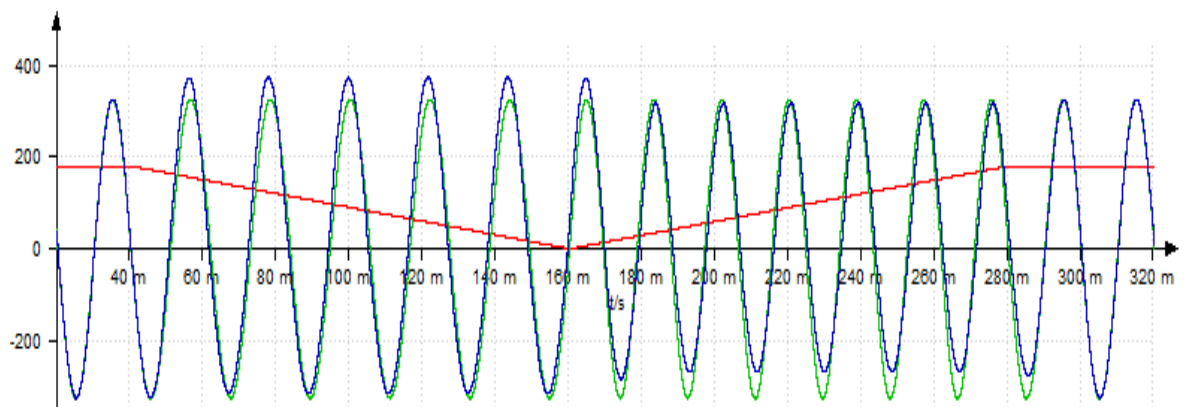


Abbildung 15: Wiederherstellung des Signals ($k=0...39$), Phasen Änderung (240ms)

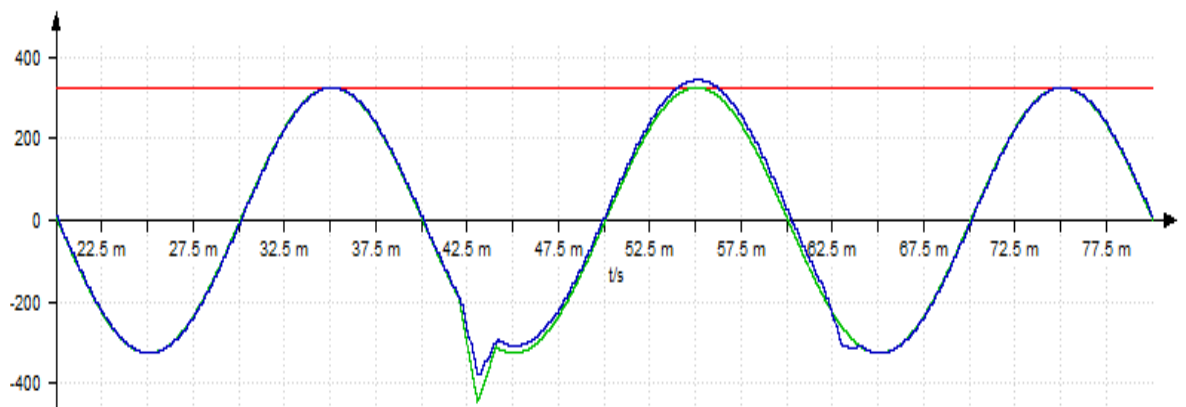


Abbildung 16: Einfluss einer transienten Überspannung (180V, 2ms) auf das Ergebnis der Amplitude der DFT

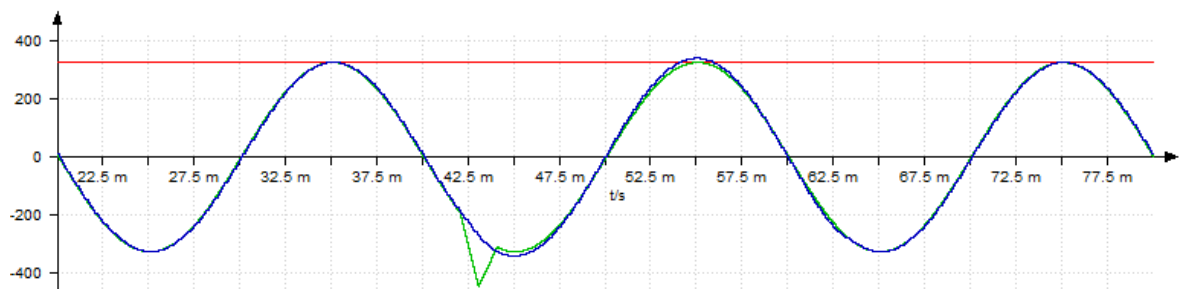


Abbildung 17: Einfluss einer transienten Überspannung (180V, 2ms) auf die Grundschwingung ($k=1$)

Abbildung 13 bis Abbildung 17: Eine Änderung der Amplitude oder der Phase des Eingangssignals verursacht eine Abweichung der gleitenden DFT-Messung nur in der darauffolgenden Periode (20ms). Das ist ein wichtiges Ergebnis. Amplituden- und Phasen-Änderungen, die vor einer Periode aufgetreten sind, haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse der gleitenden DFT-Auswertung. Dies spricht für die Robustheit der DFT.

Ein Vergleich der Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigt, wie die Abweichungen der DFT-Messung bei einer schnellen Änderung des Eingangssignals größer werden. Durch die Mittelwertbildung entsteht ein Tiefpasseffekt, so dass schnelle Änderungen der Eingangsgröße die DFT-Auswertung nur gedämpft passieren.

Bei transienten Überspannungen, wie in Abbildung 17 dargestellt, ist die Abweichung der DFT-Messung der Grundschwingung klein. Dies ist ein positives Ergebnis für die Stabilität des Spannungswinkels θ_u und damit für die Regelung des Stromes mittels Ladesäule.

Die Amplituden- und Phasen-Änderung des Eingangssignales beeinflussen die DFT-Berechnung und damit die Amplitude und Phase jeder Oberschwingung. Die reale Änderung der Amplitude in einer Oberschwingung wirkt sich innerhalb der DFT-Auswertung auf mehrere Oberschwingungen aus, aber die Summation aller berechneten Oberschwingungen ergibt wieder das reale Eingangssignal. In Abbildung 18 werden die Amplitude des tatsächlichen Eingangssignals (rot) und die Fourier-Koeffizienten (Amplitude) der Grundschwingung (grün), der zweiten OS (blau) und der dritten OS (gelb) miteinander verglichen. Obwohl die Amplitudenänderung nur in der 50Hz Grundschwingung stattfindet, ergeben sich in der DFT-Auswertung auch Oberschwingungen höherer Ordnung.

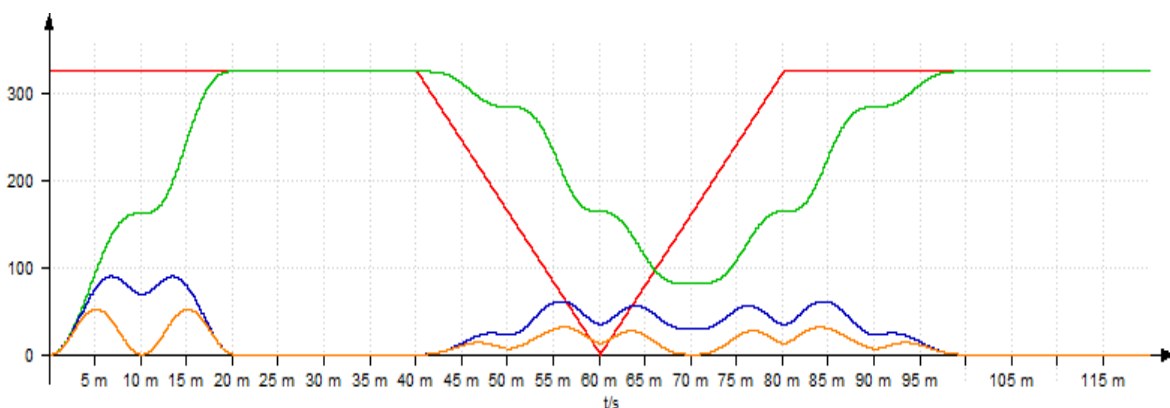


Abbildung 18: Amplituden Änderung der Grundschwingung erzeugt Oberschwingung

4.5 Zusammenfassung zur Auswertung mittels DFT

Robustheit:

- Die Abweichung zwischen der Netzfrequenz und der Analyse-**Frequenz** der DFT führt zu keinerlei Informationsverlust.
- Transiente Schwankungen der Netzspannung haben nach 20ms (eine Periode T) keinen Einfluss mehr auf die DFT-Auswertung.

Genauigkeit:

- Die Auswertung der **Amplitude** der Oberschwingungen liefert exakte Ergebnisse, um damit die Überschreitung der Oberschwingungs-Grenzwerte überwachen zu können.

Rechenzeitaufwand:

- Die gleitende DFT braucht nur wenige Berechnungsschritte (Addition, Multiplikation) pro Abtastperiode. Die DFT-Auswertung kann mit Sample-Frequenzen von 200kHz realisiert werden, ohne dass der Prozessor überlastet wird.

Istwert für die Regelung:

- Mit der gleitenden DFT wird jede Harmonische separat berechnet. Daher hat man einen einfachen Algorithmus, der für jede einzelne Harmonische verwendet werden kann. Der Algorithmus der gleitenden DFT ist für die Istwert-Erfassung der Regelung des Wechselrichters ausgewählt worden, weil er in jedem Berechnungsdurchlauf einen neuen Wert liefert und sich robust gegenüber Störungen erwies.
- Die DFT-Auswertung basiert auf dem gleitenden Mittelwert einer Periode (20ms). Diese Trägheit macht es erforderlich den überschwingungsbehafteten Strom zu messen und mit dem Strom jeder Oberschwingung, ausgewertet mit der DFT, zu vergleichen. Die Oberschwingungen der Ströme generieren dabei den Sollwert für die Regelung, der Istwert ist im direkt gemessenen Strom enthalten. Damit lassen sich nur statische Oberschwingungen ausregeln, eine Reaktion auf transiente Störungen ist nicht möglich.

Die FFT (Fast Fourier Transform) ist ein effizienter Algorithmus zur Berechnung des gesamten Spektrums. Die FFT ist optimiert für die Programmierung von digitalen Prozessoren. Es ist der am meisten verwendete Algorithmus für die Signalanalyse, insbesondere für die Berechnung von Spektrogrammen. Die FFT hat den Nachteil, dass es nicht möglich ist nur 3 oder 4 ausgewählte Harmonische auszuwerten. Daher ist die FFT eher für die Messung und Überwachung aller Oberschwingungen der Netzspannung geeignet und liefert in größeren zeitlichen Abständen das gesamte Oberschwingungsspektrum mit deren Grenzwertüberschreitung.

5 Symmetrie des Wechselrichters

Die Ladesäule speist symmetrischen Strom ein. Oberschwingungen sind jedoch nicht immer auf die drei Leiter u, v, w symmetrisch verteilt. Für Ihre Kompensation muss die Ladesäule auch unsymmetrischen Strom einspeisen können. Diese Eigenschaft der Ladesäule wird in diesem Kapitel untersucht.

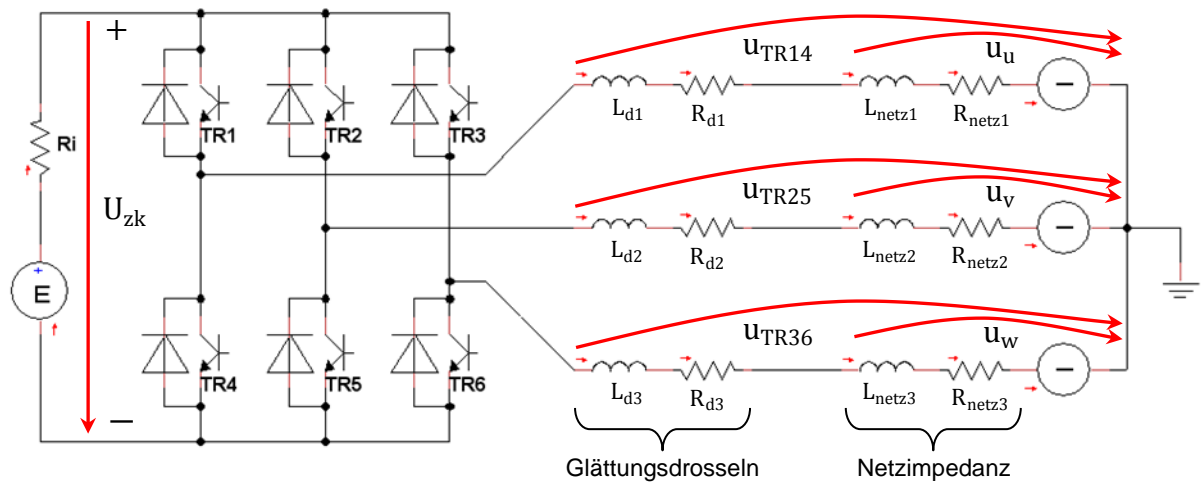


Abbildung 19: Schaltung des dreiphasigen Wechselrichters

Die 6 Transistoren in Abbildung 19 bilden 3 Transistorpaare: (TR1 & TR4), (TR2 & TR5), (TR3 & TR6), die mit je einem der 3 Stränge u, v, w des dreiphasiges Netzes verbunden sind. In jedem Transistorpaar ist immer ein Transistor leitend und ein Transistor sperrend, so dass kein Kurzschluss der Zwischenkreisspannung entstehen kann. Damit sind die 2 Zustände jedes Transistorpaares 0, wenn der Strang auf negatives Potential und 1 wenn der Strang auf positives Potential der Zwischenkreisspannung geschaltet ist. Die logische Schaltungskombination ergibt $2^3 = 8$ Standardvektoren, die in Abbildung 20 mit α , β - und u, v, w –Koordinatensystemen gezeichnet sind.

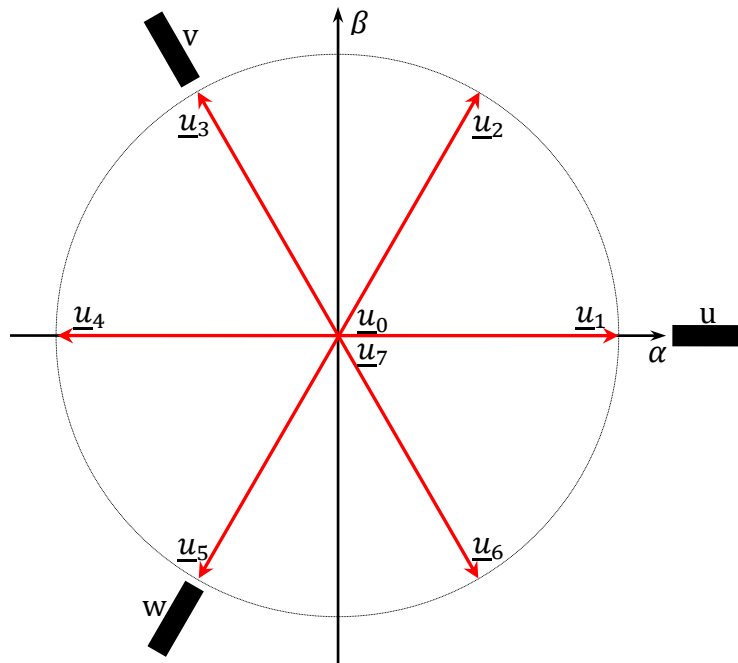


Abbildung 20: Die 8 Standardvektoren [QUANG99]

Wenn alle Transistorpaare an demselben Potenzial der Zwischenkreisspannung geschaltet sind, ergeben sich zwei Nullvektoren ($|\underline{u}_0|$ oder $|\underline{u}_7|$). Der Betrag der 6 anderen Standardvektoren ist

$$|\underline{u}_1| = |\underline{u}_2| = |\underline{u}_3| = |\underline{u}_4| = |\underline{u}_5| = |\underline{u}_6| = \frac{2}{3} \cdot U_{zk}$$

bei PI-Modulation. Jeder Standardvektor wird durch einen Schaltzustand der Transistorbrücke mit den Ausgangsspannungen der drei Transistorpaare u_{TR14} , u_{TR25} und u_{TR36} abgebildet. Tabelle 30 stellt die Zusammenschaltung der Batterie und des Netzes mit den 8 Schaltzuständen der Transistorbrücke dar.

Standard Vektoren	TR1 TR4	TR2 TR5	TR3 TR6	u_{TR14}	u_{TR25}	u_{TR36}	Schaltung des Stromteilers
\underline{u}_0	0	0	0	0	0	0	
\underline{u}_1	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
\underline{u}_2	1	1	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	
\underline{u}_3	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
\underline{u}_4	0	1	1	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	
\underline{u}_5	0	0	1	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	
\underline{u}_6	1	0	1	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	
\underline{u}_7	1	1	1	0	0	0	

Tabelle 30: Standard Vektoren und Ausgangsspannungen der Transistorpaare

Die Zwischenkreisseite des Wechselrichters enthält keine Referenzspannung bzw. Masse des Netzes. Damit sind die Netzspannung und die Zwischenkreisspannung unabhängige Spannungsquellen, die zwei getrennte Strombilanzen besitzen. Der Zwischenkreisstrom fließt vom positiven Pol durch den Knoten A und zum negativen Pol zurück und bildet mit den Glättungsinduktoren (RLd1, RLd2, RLd3) einen Stromteiler. In der Tabelle 30 sind die 8 Schaltungskombinationen des Stromteilers dargestellt. Die Glättungsinduktoren sind auf allen drei Strängen identisch und damit sind die Ausgangsspannungen der 3 Transistorpaare immer symmetrisch

$$u_{TR14}(t) + u_{TR25}(t) + u_{TR36}(t) = 0$$

und können jeweils 5 Spannungswerte annehmen.

$$\frac{2}{3} \cdot U_{zk} ; \frac{1}{3} \cdot U_{zk} ; 0 ; -\frac{1}{3} \cdot U_{zk} ; -\frac{2}{3} \cdot U_{zk}$$

Die Symmetrie der Transistorausgangsspannungen garantiert eine Symmetrie der Netzströme, solange die Netzspannungen auch symmetrisch sind.

$$u_u(t) + u_v(t) + u_w(t) = 0 \rightarrow i_u(t) + i_v(t) + i_w(t) = 0$$

Für die Erzeugung der 50Hz Grundschiwingung des Netzstromes ist diese Symmetrie ein Vorteil. Für die Oberschwingungskompensation werden auch unsymmetrische Ströme benötigt. Diese können mit diesem Wechselrichter nicht erzeugt werden, nur Oberschwingungen des Mit- und Gegensystems (Kapitel 1.3) können kompensiert werden. Die Kompensation von Oberschwingung des Nullsystems mit der Steuerung der Zwischenkreisspannung wird in einer weiteren Arbeit untersucht.

6 Oberschwingungskompensation mit dem Wechselrichter

Um die Spannungsüberschwingungen zu reduzieren, muss der Wechselrichter einen Kompensationsstrom erzeugen.

Im ersten Teil dieses Kapitels basiert die Berechnung des Kompensationsstroms und die Regelung des Wechselrichters nur auf der Messung der Spannungsüberschwingungen basiert.

Im zweiten Teil wird die ursprüngliche Stromregelung des Wechselrichters auch zur Netzspannungsregelung genutzt und dafür eine neue Stromregelung entworfen.

6.1 Spannungsregelung des Wechselrichters

Zuerst wird die Spannungsregelung mit einer überschwingungsfreien Netzspannung analysiert. Dann wird die Regelung mit Oberschwingungskompensation untersucht.

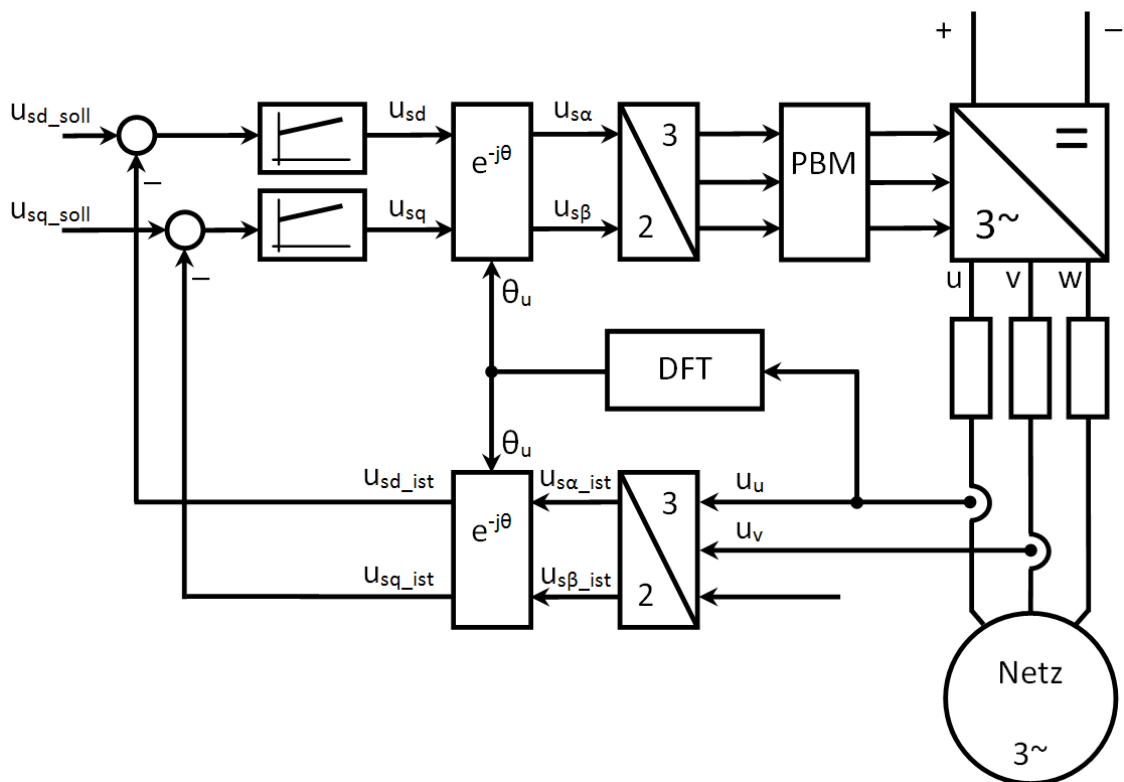


Abbildung 21: Regelkreis des spannungsgeregelten Wechselrichters

6.1.1 Spannungsreglung ohne Oberschwingung

Die symmetrische dreiphasige Netzspannung enthält nur die 50Hz-Grundschiwingung mit einer Amplitude von 325V.

Die DFT-Auswertung der Netzspannung $u_u(t)$ berechnet den Winkel θ_u für die Koordinatentransformation. Damit ist der Winkel θ_u ein 20 ms Mittelwert. Die Istwerte sind dann nach 20ms der Simulation konstante Werte.

$$u_{sd_ist} = 325,67V ; u_{sq_ist} = -0,79V$$

Die Glättungs-drosseln und die Netzimpedanzen bilden einen Spannungsteiler. Die Transistorausgangsspannungen sind damit nicht vollständig gefiltert und ein kleiner Anteil von $\pm 2V$ ist auf den Istwerten u_{sd_ist} und u_{sq_ist} zu sehen (Abbildung 22).

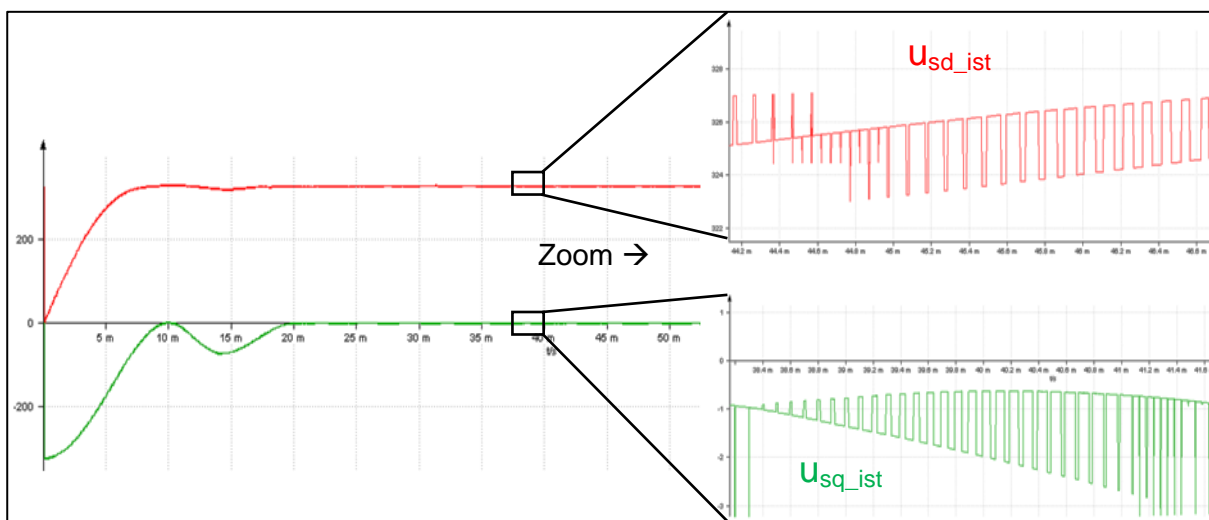


Abbildung 22: Istwerte der Spannungsreglung ohne Oberschwingung

Die Sollwerte für die Regelung des Energieflusses zwischen der Batterie und dem Netz sind konstante Werte

$$u_{sd_soll} = 325V ; u_{sq_soll} = 0V$$

Daraus folgt eine Regelung mit konstanten Ist- und Sollwerten. Der Ausgang des P-Reglers ist dann ein konstanter Wert und der Ausgang des I-Reglers steigt oder sinkt stetig.

$$u_{P\text{-Regler}} = K_p \cdot (u_{soll} - u_{ist})$$
$$u_{I\text{-Regler}} = K_I \cdot (u_{soll} - u_{ist}) \cdot t$$

Diese Spannungsreglung kann keinen Leistungsfluss zwischen der Batterie und dem Netz bestimmen bzw. regeln. Eine Regelung mit Stromistwerten ist erforderlich, um den Strom der 50Hz-Grundschiwingung zu regeln.

Eine Simulation des Wechselrichters mit der gewöhnlichen Stromreglung ergibt folgende Regler-Ausgangswerte:

	u_{sd}	u_{sq}
P-Regler	0,0437	0,185
I-Regler	281,87	4,57
Stromsollwert: 0A; $U_{zk} = 800V$		

Tabelle 31: Regler-Ausgangswerte der Stromreglung, $U_{zk} = 800V$

Die zwei ermittelten I-Regler-Werte werden als Startwert des I-Reglers für die Spannungsregelung eingetragen. Der Wechselrichter kann dann eine 50Hz-Grundschiwingung mit 0A Amplitude erzeugen und ein Gleichgewicht zwischen der Batterie und dem Netz halten.

Nachfolgend wird eine Oberschwingungskompensation mittels Spannungsregelung untersucht.

6.1.2 Spannungsregelung mit Oberschwingungen

Die symmetrische dreiphasige Netzspannung enthält die 50Hz-Grundschiwingung mit einer Amplitude von 325V und zwei Harmonische mit 100Hz und 150Hz.

Ziel ist es, aus der Messung der Spannungsoberschwingungen einen Kompensationsstrom zu erzeugen. Im Regelkreis (Abbildung 21) sind die Istwerte u_{sd_ist} und u_{sq_ist} eine direkte Abbildung der Netzspannung und enthalten damit alle Spannungsoberschwingungen. Durch die Negation der Istwerte vor den PI-Regler, ist die Phase der Spannungsoberschwingungen um 180° gedreht. Die Amplitude des Kompensationsstromes wird durch den P-Regler eingestellt.

6.1.2.1 Erste Simulation der OS-Kompensation mit der Spannungsregelung

Simulationsparameter								
HMIN	F_takt	U_zk	Ld	Rd	L_netz	R_netz	Kp	Ki
2 μ s	10kHz	800V	4mH	200m Ω	20 μ H	5m Ω	10	2

	PARAMETER <u>ohne</u> Kompensation		MESSWERTE <u>mit</u> Kompensation				BERECHNUNG der vollständigen Kompensation		
Freq	Spannung		Spannung		Strom		Strom		
	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Δ Phase
50Hz	325V	0°	325,0V	0°	3,29A	339,7°			
100Hz	5 V	0°	4,7 V	1,3°	23,4 A	91,5°	369 A	111°	20,5°
150Hz	10 V	0°	9,4 V	0,68°	30,1 A	93°	512 A	105°	12°

Tabelle 32: OS-Kompensation mit der Spannungsreglung

Die OS-Kompensation ist ein Erfolg, die Oberschwingungen der Netzspannung sind um 6% reduziert.

Vergleich des berechneten/gemessenen Kompensationsstromes:

- Der erzeugte Kompensationsstrom kann die Spannungsüberschwingungen nur auf 6% reduzieren
- Ein Phasenunterschied von 20° und 12° zeigt, dass der eingespeiste Kompensationsstrom nicht die optimale Phase besitzt.

Der Regler-Ausgangswert u_{sd} hat in der Simulation in Tabelle 32 seine maximale Grenze fast erreicht. Die Oberschwingungskompensation kann einen höheren Grad erreichen, indem die Zwischenkreisspannung und die P-Regler-Verstärkung erhöht werden.

6.1.2.2 Kompensationsgrad in Abhängigkeit der P-Regler-Verstärkung

Die I-Regler-Startwerte müssen mit der höheren Zwischenkreisspannung neu berechnet werden.

	u_{sd}	u_{sq}
I-Regler	288,05	3,50
Stromsollwert: 0A; $U_{zk} = 1800V$		

Tabelle 33: Regler Ausgangswerte der Stromreglung, $U_{zk} = 1800V$

Die ungefilterten Transistorausgangsspannungen (Abbildung 22) werden durch den P-Regler verstärkt ($K_p = 20$) und verschlechtern die Regelung. Ein 100 μs Mittelwert der Istwerte filtert dieses Störsignal und verbessert die Regelung der 50Hz Stromgrundschwingung (Tabelle 34).

PARAMETER	MESSWERTE: Netzstrom Effektivwert		
Stromsollwert	mit Stromreglung	mit Spannungsreglung	
		ohne 100µs Mittelwert	mit 100µs Mittelwert
0 A	0,9 A	14,1 A	2,8 A

Tabelle 34: Verbesserung der Spannungsreglung mittel 100µs Mittelwert

Der Nachteil dieses 100µs Mittelwertes ist eine Phasenverschiebung jeder Harmonischen: 1,8° (50Hz), 3,6° (100Hz) und 5,4°(150Hz). Diese Phasenverschiebung würde bei höheren Oberschwingungsfrequenzen (1500Hz) die Regelung stören. Für die Kompensation von Oberschwingungen mit höherer Frequenz muss die Taktfrequenz von 10kHz auf 50kHz erhöht werden, der Mittelwert kann dann verkürzt werden.

Die Simulation wird mit einer Zwischenkreisspannung $U_{zk} = 1800V$ und drei verschiedenen P-Regler-Verstärkungen 20, 32, 70 durchgeführt.

Simulationsparametern								
HMIN HMAX	F_takt	U_zk	Ld	Rd	L_netz	R_netz	Kp	Ki
1µs	10kHz	1800V	4mH	200mΩ	20µH	5mΩ	20...70	2µ

Tabelle 35: Simulationsparameter / Variation der P-Regler Verstärkung

	PARAMETER		MESSWERTE Netzspannung: U_u					
	Spannung		$K_p = 20$		$K_p = 32$		$K_p = 70$	
Frequenz	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl	Phas
50 Hz	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°	325 V	0°
100 Hz	5 V	0°	4,45 V	2,15°	4,18 V	3,17°	3,51 V	5,98°
150 Hz	10 V	0°	8,94 V	1,69°	8,41 V	2,54°	7,09 V	4,72°

Tabelle 36: Messwerte Netzspannung / Variation der P-Regler Verstärkung

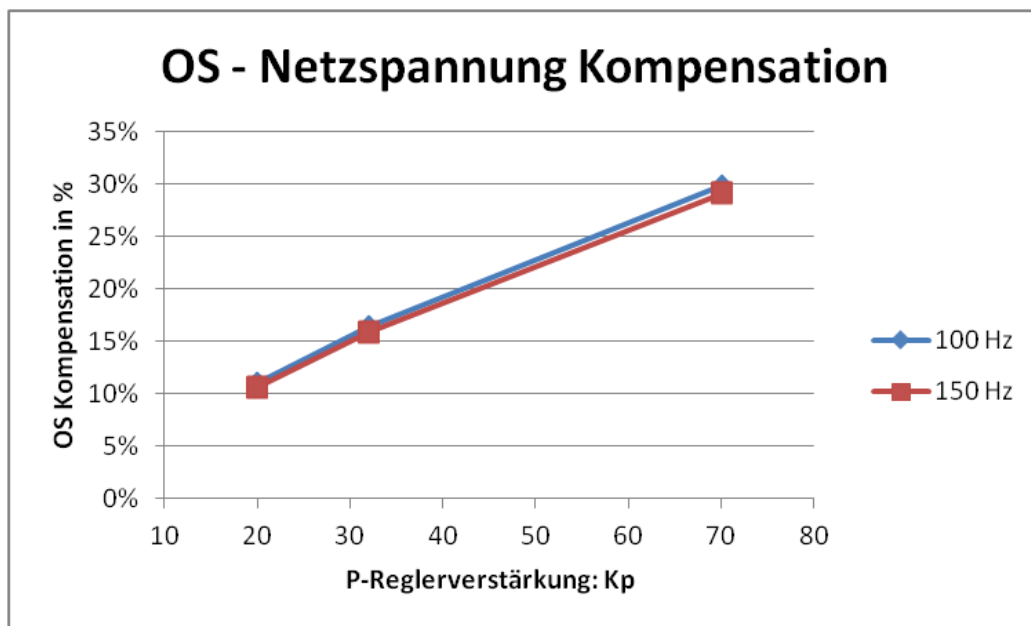


Abbildung 23: Ergebnisse der Kompensation / Variation der P-Regler Verstärkung

Höhere P-Regler-Verstärkung verbessert die Kompensation der OS (bis zu 30%), indem höhere Kompensationsströme fließen. Die P-Regler-Verstärkung hat wenig Einfluss auf die Phase des Kompensationsstromes.

Die Amplitude der OS beider Regler-Ausgänge U_{sd} und U_{sq} ist gleich und um 90° verschoben.

6.1.2.3 Was bestimmt die Phase des Kompensationsstromes?

In der nächsten Simulation wurden die Netzimpedanzen geändert (überwiegend Ohmsch) und die Phase des Idealen Kompensationsstroms neu berechnet.

Simulationsparameter								
HMIN HMAX	F_takt	U_zk	Ld	Rd	L_netz	R_netz	Kp	Ki
1μs	10kHz	1800V	4mH	200mΩ	20nH	50mΩ	70	2μ

Tabelle 37: Simulationsparameter / Variation der Netzimpedanz

Spannung \hat{u}_u	PARAMETER		MESSWERT		Kompensation
Frequenz	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl
50 Hz	325 V	0°	325 V	0°	
100 Hz	5 V	0°	2,53 V	59°	50 %
150 Hz	10 V	0°	6,84 V	48°	32 %

Tabelle 38: Messwerte Netzspannung / Variation der Netzimpedanz

Strom \hat{i}_u	BERECHNUNG		MESSWERT		Kompensation
Frequenz	Ampl	Phas	Ampl	Phas	Ampl
50 Hz	0 A	0°	18 A	257°	
100 Hz	100 A	180°	86 A	150°	86 %
150 Hz	200 A	180°	149 A	137°	75 %

Tabelle 39: Messwerte Netzstrom / Variation der Netzimpedanz

Die Phase des Kompensationsstroms ist nicht optimal. Mit nur einem Regelkreis für die Kompensation aller Oberschwingungen kann die Phase jedes Kompensationsstroms nicht getrennt geregelt werden. Ein Regelkreis pro Harmonischen ist notwendig und wird im Kapitel 6.2 entworfen.

Die Spannungsreglung hat gezeigt, dass die Reglung des Wechselrichters auch mit Wechselgrößen arbeiten kann und liefert damit gute sinusförmige Kompensationsströme.

6.2 Stromreglung des Wechselrichters

Ziel ist es, die 50Hz-Stromgrundschiwingung und einen Kompensationsstrom für die Kompensation eine Harmonische zu generieren und zu regeln.

Der Regler muss mit Echtzeit-Istwerten arbeiten, um die Sinusform des Stromes zu generieren. Der 20ms Mittelwert der DFT ist zu träge und ermöglicht es nicht, mit dem Regler einen sinusförmigen Strom zu erzeugen. Die folgende Reglung (Abbildung 24) enthält zwei Regelkreise, die ursprüngliche Echtzeit-Reglung der 50Hz-Stromgrundschiwingung und eine Reglung des Kompensationsstromes mit Istwerten aus der DFT-Auswertung. Die Ausgangswerte der OS-Reglung werden als Sollwerte in die Echtzeit-Reglung eingeführt.

6.2.1 Regelung des Kompensationsstromes

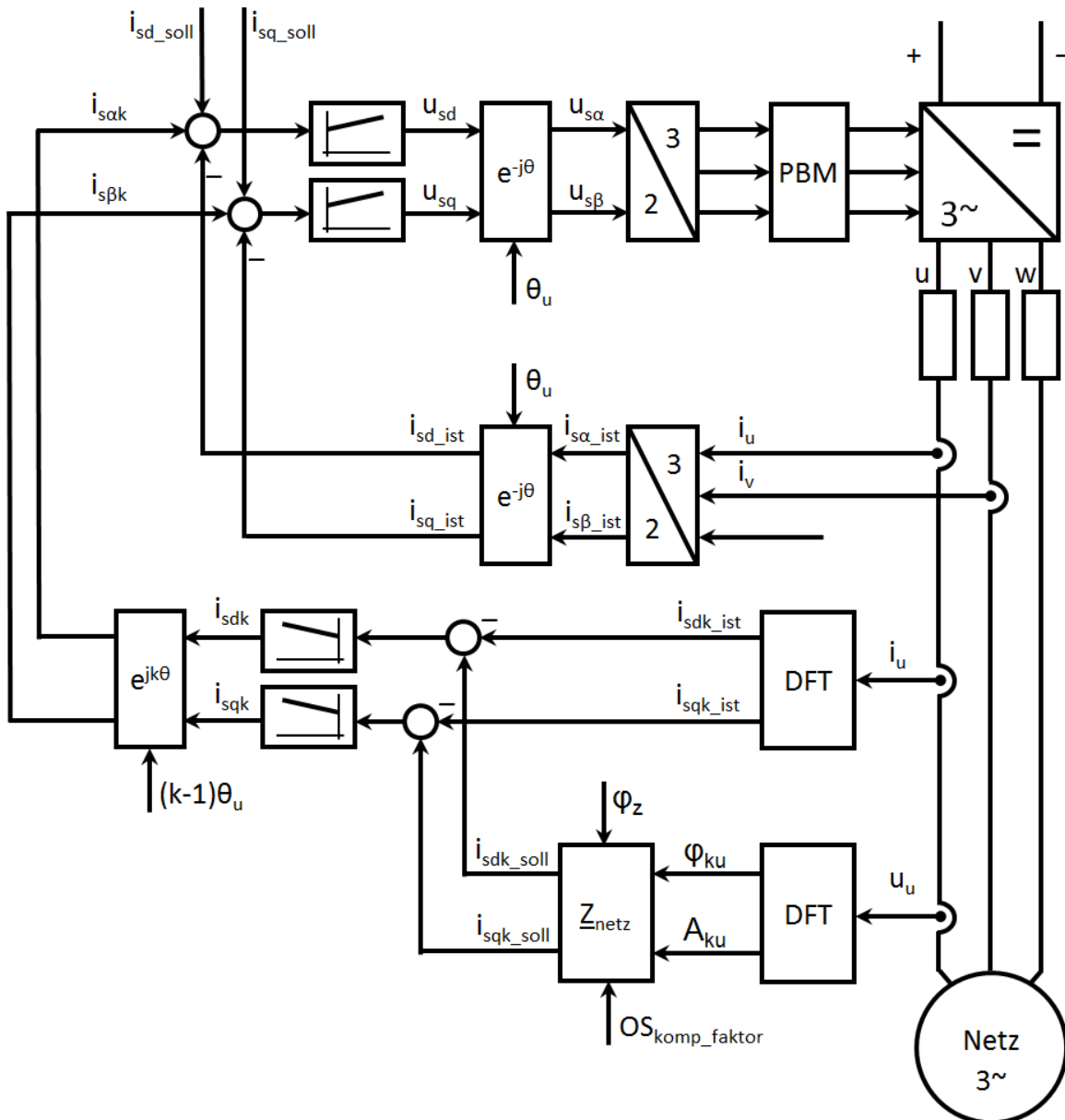


Abbildung 24: Regelkreis der Oberschwingungskompensation

Die Istwerte (i_{sdk_ist} , i_{sqk_ist}) für die Regelung des Kompensationsstromes werden mit der Fourier-Analyse (DFT) des Stromes i_u erfasst. Aus der Fourier-Analyse (DFT) der Spannung u_u und der Netzimpedanz werden die Sollwerte (i_{sdk_soll} , i_{sqk_soll}) ermittelt. Die Amplitude des Kompensationsstromes wird mit dem Faktor OS_{komp_faktor} definiert.

Die Ausgangswerte der OS-Reglung (i_{sak} , i_{sbk}) sind Wechselgrößen und werden, wie in der Spannungsreglung, durch die P-Regler der Echtzeit-Reglung verstärkt.

Die Echtzeit-Reglung sorgt für die Sinusform der Stromgrundschwingung und der Harmonischen. Die OS-Reglung stellt die Amplitude und Phase des Kompensationsstroms ein.

6.2.2 Simulation der Oberschwingungskompensation

Simulationsparameter										
HMIN HMAX	F_takt	U_zk	Ld	Rd	L_netz	R_netz	Kp	Ki	Kp OS	Ki OS
1µs	10kHz	1400V	4mH	200mΩ	20µH	5mΩ	5	200	0,5	70

Tabelle 40: Simulationsparameter / Stromreglung

In Abbildung 25 sind die Verläufe der Sollwerte (Blau, Rot) und der Istwerte (Orange, Grün) beide Reglungen für die Erzeugung eines 50A Kompensationsstroms zur Reduzierung der 150Hz Harmonischen während der Ladung der Batterie mit 50A. Die 3. Harmonische der Netzspannung wird damit um 5% reduziert. Der Netzstrom enthält die 50Hz Grundschwingung und die 150Hz Harmonische. Nach 100ms erreicht die OS-Reglung ihren Endwert und stellt die Phase des Kompensationsstromes optimal ein.

Der Wechselrichter generiert die Grundschwingung und die Harmonischen in dem Mitsystem (Strang u: 0°, Strang v: -120°, Strang w: 120°)

Die Kompensation von mehreren Harmonischen ist möglich. Mehrere OS-Reglungen müssen dann parallel arbeiten.

Die Kompensation von Harmonischen höherer Ordnung ist problematisch.

- Die Taktfrequenz der Transistorsteuerung muss von 10kHz auf 50kHz erhöht werden, damit ein gutes sinusförmiges Signal erzeugt werden kann.
- Die Zwischenkreisspannung und die Glättungsdrosseln definieren den maximalen Anstieg des Stromes. Bei höherer Frequenz wie 1000Hz ist die Amplitude des Kompensationsstromes schnell begrenzt (z.B. 10A).
- Mit höherer Zwischenkreisspannung und kleineren Glättungsdrosseln können stärkere Kompensationsströme erzeugt werden, der Wechselrichter erzeugt aber selber mehr Oberschwingungen (U und I) im Bereich der Taktfrequenz (50kHz, 100kHz, 150kHz ...).

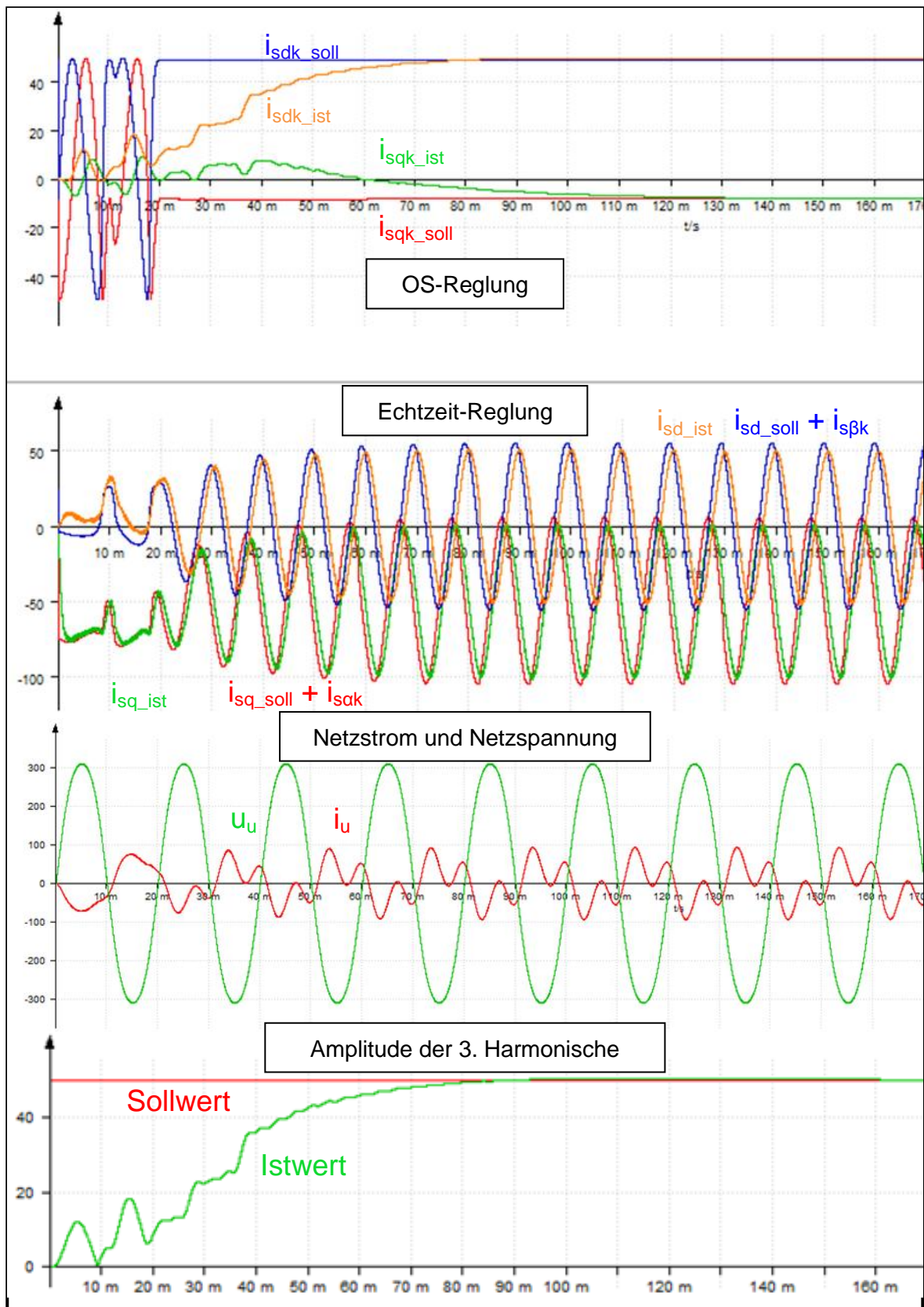


Abbildung 25: OS-Kompensation der 3. Harmonischen bei der Ladung der Batterie

7 Ergebnisse und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und eine Bewertung der Leistung aus Sicht des Autors vorgenommen. Ein Ausblick zeigt die geplante Weiterentwicklung des Projektes auf.

7.1 Ergebnisse

Die Intelligente Ladesäule ist ein Forschungsprojekt der Professur Antriebs- und Regelungstechnik an der Hochschule Mittweida. Die Kernaufgabe einer Intelligenten Ladesäule ist das sichere und schnelle Laden des E-Fahrzeuges. Zusatzfunktionen der Ladesäule zielen auf die Verbesserung der Netzspannungsqualität, so kann die Ladesäule während der Ladung des Elektrofahrzeuges, im Phasenschieberbetrieb arbeiten und zusätzlich noch die Spannungsüberschwingungen kompensieren. Bei schwachem Netz oder einem drohenden Netzausfall kann die Ladesäule durch Rückspeisung der Fahrzeugenergie das Netz stützen. Das Thema „Netzüberschwingungskompensation mit Hilfe der Intelligenten Ladesäule“ ergab sich als Teilgebiet der Entwicklung dieses Forschungsprojekt und ist Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit.

Erst wurde der Begriff der Überschwingungen für das Niederspannungsnetz definiert und anschließend die Ursachen und die Auswirkungen der Überschwingungen erklärt.

Aus den Richtlinien und Normen des Niederspannungsnetzes wurden die Grenzwerte für Überschwingung von Spannung und Strom abgelesen, um so die spätere Arbeitsweise der Ladesäule ableiten zu können.

Das zentrale Thema der OS-Kompensation wurde durch eine theoretische Vorgehensweise untersucht. Durch die Einspeisung eines Kompensationsstroms wurde die Reduzierung der Überschwingungen der Netzspannung in verschiedenen Netzkonfigurationen simuliert. Die erfolgreiche Simulation war die Basis für die Entwicklung der OS-Kompensation mit Hilfe der Intelligenten Ladesäule.

Knackpunkt war die robuste und zuverlässige Auswertung der Überschwingungen. Dabei wurde entschieden, dass die Abbildung des gesamten Frequenzspektrums der Netzspannung mit der Fast Fourier Transformation (FFT) erfolgt. Als Istwert-Erfassung für die Regelung des Wechselrichters kommt nur die gleitende Diskrete Fourier Transformation (DFT) in Frage, weil damit einzelne Überschwingungen in minimaler Rechenzeit auswertbar sind.

Damit konnte ein Konzept für die technische Umsetzung der OS-Kompensation mittels Intelligenter Ladesäule erarbeitet werden. Die Regelung des Wechselrichters wurde so

erweitert, dass die Ströme der Grund- und Oberschwingung separat geregelt werden können.

7.2 Bewertung der Arbeit

Alle Anforderungen und Ziele dieser Bachelorarbeit wurden erfüllt. Sie bildet damit die Grundlage für OS-Kompensation und ermöglicht die Entwicklung einer Intelligenten Ladesäule.

Ausgehend von Simulationen konnte bewiesen werden, dass die Intelligente Ladesäule durch Reduzierung der Oberschwingungen, eine wesentliche Rolle in der Verbesserung der Qualität des Niederspannungsnetzes spielen kann.

Die aus dem vorangegangenen Praktikum gewonnenen Erkenntnisse konnte mit Hilfe dieser Arbeit um das Verständnis der Energieflussregelung und Spannungsqualität erweitert werden.

Ein Algorithmus zur Auswertung der Oberschwingungen wurde ausgewählt und auf Robustheit und Zuverlässigkeit geprüft. Damit wurde die Anwendbarkeit der gleitenden DFT für die Regelung der Oberschwingungskompensation nachgewiesen.

Die Ergänzung der Energieflussregelung mit dem DFT-Modul ermöglicht die OS-Kompensation während der Ladung des E-Fahrzeugs.

7.3 Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts „CO₂- neutrale E-Mobilität im Smart Grid“ wird ein Prototyp der Intelligenten Ladesäule entwickelt.

In einer vorherigen Untersuchung wurde die Möglichkeit einer Blindleistungskompensation während der Ladung des E-Fahrzeugs überprüft. Die vorliegende Bachelorarbeit schließt den simulativen Arbeitsteil und die Konzeptionierung zur Oberschwingungskompensation ab.

Parallel zur Erstellung dieses Modells begann der Aufbau der Hardware für die Intelligente Ladesäule.

Mit der sich anschließenden Masterarbeit soll eine Energieflussregelung für die Intelligente Ladesäule programmiert werden, sodass erste Ladezyklen erprobt werden können.

Der finale Aufbau und die Optimierung der Intelligenten Ladesäule soll während der angestrebten Promotion realisiert werden.

Literatur

- [FUBE12] Fuld, Berthold, Oberschwingungsströme: EN 61000-3-2 & EN 61000-3-12 Ansätze zur Erfüllung ihrer Anforderungen, URL: <http://www.fuld.de/html/vortrag_pfc.pdf>, verfügbar am 23.01.2012
- [ELCO12] URL: <<http://www.elektrocomgmbh.de/netzparameter.html>>, verfügbar am 22.01.2012
- [TÜVS12] URL: <http://www.netinform.net/GA/Wegweiser/Guide2.aspx?Ebene1_ID=23&Ebene2_ID=339>, verfügbar am 22.01.2012
- [HÖGÜ11] Höck, Günter, „Dirty Power“ – Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher, URL: <http://www.gmc-instruments.ch/src/download/dDirty_Power.pdf>, verfügbar am 19.05.2011
- [HTWD12] Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Merkmale der Spannung nach EN 50 160, URL: <http://www.htw-dresden.de/fileadmin/userfiles/et/Labore/Hochspannung/Unterlagen/KP2_EE3.pdf>, verfügbar am 23.01.2012
- [EMCS11] Electromagnetic Compatibility (EMC) Low-Frequency Standards, URL: <<http://carcamal.ele.cie.uva.es/CEM/articulos/IEC.pdf>>, verfügbar am 24.05.2011
- [PORT12] Simulationssoftware Portunus von Adapted Solution, Hilfe: Analog-Solver
- [NEFEM12] URL: <<http://www.netzfrequenzmessung.de/index.htm>>, verfügbar am 16.01.2012
- [VDN12] Verband der Netzbetreiber: TransmissionCode 2007 Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, URL: <http://www.n-ergie-netz.de/N-ERGIE-NETZ/dokumente/070801TransmissionCode_2007.pdf>, verfügbar am 13.01.2012

- [ENTSOE12] ENTSO-E: Analysis of CE inter-area oscillations of 19 and 24 February 2011 URL: <https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/RG_SOC_CE/Top7_110913_CE_inter-area-oscil_feb_19th_24th_final.pdf>, verfügbar am 20.01.2012
- [QUANG99] Quang, Nguyen Phung, Praxis der feldorientierten Drehstromantriebsregelungen, expert Verlag, 1999
- [NPE12] Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, URL: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_e_mob_2.pdf>, verfügbar am 05.02.2012

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 06.03.2012

Jérémie Foulquier